

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ELETTRICA**

**SICUREZZA IN GALLERIA FERROVIARIA: STUDIO E
PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA INNOVATIVO DI
ILLUMINAZIONE A SORGENTI LED**

**RAILWAY TUNNEL SAFETY: STUDY AND DESIGN OF AN
INNOVATIVE LIGHT SYSTEM WITH LED SOURCES**

Relatore: Prof. Pietro Fiorentin

Correlatore: Ing. Guido Buffarini

Laureando: UGO VACCA

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

*Ai miei genitori,
con affetto e gratitudine.*

SOMMARIO

Questo elaborato nasce a seguito di una riflessione sull'ottimizzazione dell'illuminazione di emergenza nelle gallerie ferroviarie site sul territorio Italiano e dallo studio della vigente normativa riguardo la sicurezza delle stesse.

Per l'appunto il DM 28-10-05 definisce obbligatorio “prevedere un impianto di illuminazione in galleria che garantisca lungo i percorsi di esodo un livello di illuminamento non inferiore a 5 lux medi [...]”; la Specifica tecnica di interoperabilità STI scrive che “deve essere installato un corrimano, ad un'altezza di circa un metro sopra il marciapiede, che deve servire da guida verso l'area di sicurezza [...]”.

In base a quanto accennato si è pensato di fondere sia da un punto di vista pratico che teorico gli assunti normativi, cercando un prodotto illuminotecnico e strutturale atto allo scopo.

L'affiancamento con la società ferroviaria ITALFERR ha fornito il supporto normativo, nonché tutto il know-how sulla materia e provveduto alla fruibilità del materiale su gallerie di futura costruzione.

La ricerca di un'azienda produttrice di apparecchi illuminotecnici già da tempo attiva nel settore dell'illuminazione di emergenza e vantante di esperienza internazionale sul campo ha portato alla collaborazione con la costruttrice ProLight (Falzes – Bolzano).

L'azienda ha dunque fornito un prodotto illuminotecnico a LED certificato, assemblabile e semplice quanto efficace, all'uso specifico.

ProLight ha messo a disposizione i suoi laboratori per le prove necessarie dell'apparecchio illuminante e del software di simulazione: sono stati scelti i componenti illuminanti LED più idonei, studiati e provati in sfera di Ulbricht, ricavandone i valori di flusso luminoso nominale.

I componenti illuminanti sono stati installati all'interno di un corpo atto allo scopo, sul quale è stata eseguita un'ulteriore misura con goniofotometro per ricavarne il solido fotometrico.

I report risultanti, tradotti in file .IES, sono stati immessi nel software di progettazione illuminotecnica Dialux e simulati in un modello galleria di caratteristiche pari a quelle del progetto.

In ultimo l'installazione dell'intero sistema illuminante è stata confrontata da un punto di vista tecnico-economico con quella tradizionale per rafforzarne la validità e i punti di forza.

Avendo avuto modo di fare uno studio completo e dettagliato sull'innovazione di questa tecnologia rapportata a gallerie lunghe di ultima generazione, è stato così messo in evidenza il beneficio dato dall'utilizzo di un'illuminazione a LED di questo tipo.

INDICE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUZIONE..... | 9 |
| CAPITOLO 1 - Normativa..... | 11 |
| 1.1 Requisiti DM [28-10-05] E STI..... | 11 |
| CAPITOLO 2 - L'elemento illuminante: la tecnologia LED..... | 15 |
| 2.1 Principio di funzionamento e componenti del LED..... | 16 |
| 2.1.1 Il Chip..... | 21 |
| 2.1.1.1 I materiali utilizzati per la realizzazione..... | 22 |
| 2.1.2 Il package..... | 24 |
| 2.2 Proprietà ottiche ed elettriche dei LED..... | 27 |
| 2.3 Dissipazione termica..... | 29 |
| 2.4 Potenza ottica ed efficienza dei LED..... | 31 |
| 2.5 Alimentazioni delle sorgenti LED..... | 32 |
| 2.6 Proprietà ottiche dei LED..... | 36 |
| 2.6.1 L'occhio umano..... | 36 |
| 2.6.2 Fotometria e grandezze illuminotecniche..... | 38 |
| 2.6.2.1 Radiometria..... | 38 |
| 2.6.2.2 Fotometria..... | 39 |
| 2.6.3 Colorimetria..... | 43 |
| 2.7 Fattori che influenzano la qualità dei LED..... | 48 |
| 2.8 Vita dei LED..... | 50 |
| CAPITOLO 3 - Sistema illuminante..... | 51 |
| 3.1 Descrizione..... | 51 |
| 3.2 Stringhe LED utilizzate e specifiche tecniche..... | 57 |
| 3.3 Azienda e produzione..... | 61 |
| CAPITOLO 4 - Descrizione sito: galleria di futura costruzione..... | 65 |
| 4.1 Progettazione nuove linee AV/AC..... | 65 |
| 4.2 Gallerie di valico..... | 66 |
| CAPITOLO 5 - Calcolo preliminare..... | 71 |
| 5.1 Apparecchio illuminante con LED OSRAM LW E67C..... | 72 |
| 5.2 Apparecchio illuminante con LED SEOUL KWT801-S..... | 76 |
| CAPITOLO 6 - Misurazione..... | 81 |
| 6.1 Laboratorio fotometrico..... | 83 |
| 6.2 Sfera integratrice LPCE-1 LISUN GROUP..... | 88 |
| 6.3 Goniofotometro LSG-1800 LISUN GROUP..... | 89 |
| 6.4 Luxmetro LX421 ASITA..... | 93 |

| | |
|---|------------|
| 6.5 Variabili di influenza nelle misure fotometriche..... | 95 |
| CAPITOLO 7 - Prove di laboratorio..... | 99 |
| 7.1 Sfera integratrice..... | 99 |
| 7.1.1 Prova a): 5 LED LW E67C – OSRAM..... | 100 |
| 7.1.2 Prova b): 19 LED LW E67C – OSRAM..... | 103 |
| 7.1.3 Prova c) 5 LED KWT801-S – SEOUL..... | 105 |
| 7.1.4 Prova d): 5 PowerLED X42180 – SEOUL..... | 107 |
| 7.1.5 Prova c ₁): 5 LED KWT801-S – SEOUL..... | 110 |
| 7.1.6 Prova c ₂): 5 LED KWT801-S – SEOUL..... | 111 |
| 7.2 Goniometro..... | 113 |
| 7.2.1 Impostazione modalità di misura e settaggio..... | 114 |
| 7.2.2 Prova a’): apparecchio illuminante 10 LED – OSRAM..... | 117 |
| 7.2.3 Prova b’): apparecchio illuminante 36 LED – OSRAM..... | 121 |
| 7.2.4 Prova c’): apparecchio illuminante 10 LED – SEOUL..... | 125 |
| 7.2.5 Prova d’): apparecchio illuminante 10 LED con ottica – SEOUL..... | 130 |
| 7.3 Considerazioni..... | 133 |
| CAPITOLO 8 - Simulazione: software Dialux..... | 135 |
| 8.1 Software Dialux e modello galleria..... | 135 |
| 8.2 Simulazioni e verifiche..... | 138 |
| 8.2.1 Verifica di calcolo preliminare..... | 139 |
| 8.2.2 Funzionamento “normale” dell’illuminazione di sicurezza..... | 143 |
| 8.2.3 Funzionamento “normale con persone esodanti”..... | 154 |
| 8.2.4 Funzionamento in caso di “guasto di un metro di corrimano illuminante”..... | 161 |
| 8.2.5 Funzionamento “normale/economico” dell’illuminazione di sicurezza..... | 163 |
| 8.2.6 Verifica attendibilità valori illuminamento..... | 167 |
| CAPITOLO 9 - Installazione del sistema..... | 169 |
| 9.1 Descrizione del sistema tradizionale..... | 169 |
| 9.1.1 Quadri di Piazzale (QdP); ubicazione e condizioni di esercizio..... | 170 |
| 9.1.2 Dorsali di distribuzione ad 1 kV..... | 170 |
| 9.1.3 Quadri di Tratta (QdT); caratteristiche generali..... | 171 |
| 9.1.4 Gestione lampade di illuminazione delle vie di esodo..... | 172 |
| 9.1.5 Cassette, pulsanti e cavi..... | 173 |
| 9.2 Descrizione del sistema innovativo a LED..... | 175 |
| CAPITOLO 10 - Realizzazione del sistema di illuminazione a sorgenti LED e ottimizzazione tecnico-economica degli impianti..... | 177 |
| CONCLUSIONI..... | 179 |
| RIFERIMENTI..... | 181 |

ALLEGATI.....183

ALLEGATO A - Decreto Ministeriale [28-10-05]

ALLEGATO B - Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI/SRT)

ALLEGATO C - Schede tecniche LED

ALLEGATO D - Disegni CAD

ALLEGATO E - Report Dialux

ALLEGATO F - Tabelle di calcolo

ALLEGATO G - Tabelle Perizie Comparative

Introduzione

Si propone di eseguire uno studio completo riguardo l'illuminazione di sicurezza di una lunga galleria ferroviaria di ultima generazione (55km) con un sistema innovativo a sorgente LED; un corrimano in acciaio inossidabile con illuminazione integrata che percorre l'intera lunghezza della galleria in esame, in sostituzione delle obsolete lampade fluorescenti compatte da 18W poste ogni 15m.

È stato eseguito uno studio volto ad ottimizzare il sistema d'illuminazione di sicurezza prestando particolare attenzione ai seguenti aspetti:

- risparmio di energia;
- aumento dell'efficienza luminosa;
- allungamento della durata di vita media degli apparecchi illuminanti;
- potenziamento delle condizioni di esercizio;
- utilizzo di materiali e componenti facilmente disgregabili, smaltibili e riciclabili nonché quindi, privi di sostanze tossiche o nocive, ossia ponendo attenzione al ciclo di vita degli apparecchi (LCA).

Il tutto rispettando e compiendo i requisiti normativi vigenti in Italia e, in un contesto allargato, in Europa.

A tal riguardo, l'illuminazione di sicurezza ricade nell'ambito normativo "Sicurezza in galleria ferroviaria" la cui situazione odierna è regolamentata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti attraverso il DM 28-10-05 pubblicato su Gazzetta Ufficiale in data 08-04-2006 , n.83, supplemento ordinario n.89 e dalla STI; specifica tecnica di interoperabilità concernente la «sicurezza nelle gallerie ferroviarie» nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità pubblicata su Gazzetta Ufficiale dell'unione Europea in data 07-03-08.

Queste definiscono un complesso ordinato di disposizioni e principi che regolano il settore del trasporto ferroviario in galleria e tutto ciò che ne concerne.

Nel **Primo capitolo** è stata riassunta e concisa la situazione normativa; in particolar modo i riferimenti normativi sono stati indicati in allegato (Allegato A per il DM e Allegato B per la STI) questo per non appesantire troppo il corpo dell'elaborato, e sono stati indicati schematicamente i requisiti minimi cui dobbiamo attenerci al fine realizzare un impianto di illuminazione di emergenza ad hoc.

Nel **Secondo capitolo** è stata introdotta e seguentemente sviscerata la tecnologia della sorgente illuminante LED. Ne abbiamo analizzato i componenti, i materiali che si utilizzano e gli aspetti salienti. È stata indicata la modalità in cui avviene l'alimentazione, la potenza ottica messa in gioco e l'efficienza, i fattori che influenzano la tecnologia LED e la vita utile prevista. Per comprendere al

meglio alcuni aspetti caratteristici delle sorgenti e interpretarne i successivi risultati delle misurazioni è stato dedicato un sotto paragrafo alle proprietà fisiologiche dell'occhio umano, nonché agli aspetti principali della fotometria e colorimetria.

L'apparecchio illuminante, la sua costituzione, i materiali utilizzati e il suo montaggio è stato descritto nel **terzo capitolo**. Vengono quindi prese in rassegna le caratteristiche costruttive e di assemblaggio del corrimano con LED integrati e indicate le specifiche delle sorgenti utilizzate.

Nel **quarto capitolo** viene descritto il sito per cui verrà studiata l'illuminazione di emergenza. Avendo a disposizione la sezione in file CAD della galleria di valico sono state derivate le effettive misure degli spazi presenti all'interno e studiato il posizionamento ottimale degli apparecchi.

Forti delle conoscenze su indicate, nel **quinto capitolo** è stato eseguito un calcolo preliminare con il posizionamento degli apparecchi a LED in galleria, per valutare in prima approssimazione, quali delle sorgenti LED a disposizione potevamo aspettarci competitive e adatte allo scopo.

Per produrre un buon progetto illuminotecnico del sito, si necessitano delle prove degli apparecchi illuminanti di "futura" installazione; non esistendo materiale fotometrico concernente le sorgenti LED, in questo dato apparecchio si è proceduto alla misura sperimentale del prototipo di apparecchio illuminante e analizzato tutti i risultati fotometrici utili.

Il **sesto capitolo**, quindi, è stato dedicato alla misurazione, alla descrizione delle apparecchiature presenti in laboratorio, ai macchinari utilizzati e al loro funzionamento, descrivendo i principi e le variabili di influenza nelle misure fotometriche.

Tutte le prove di laboratorio effettuate sono state analizzate singolarmente nel **settimo capitolo**, dove ognuna di queste è stata scrupolosamente descritta e i risultati emersi dovutamente interpretati. Nell'**ottavo capitolo** i risultati fotometrici dell'apparecchio prototipo, sono stati trasformati in file .IES per essere letti dal software di calcolo e progettazione Dialux. È stato creato un modello galleria e simulata l'installazione. Sono quindi emerse le soluzioni migliori o alternative, analizzando differenti tipologie di sorgenti e scenari.

Per inquadrare il tutto in un contesto più grande è stata descritta l'installazione del sistema.

Nel **capitolo nono** si esplica come è strutturato il *sistema-galleria*, prendendo dapprima in esame il modello tradizionale, quindi il sistema innovativo col quale si intende rinnovare. Viene descritto cosa si intende per quadri di piazzale, quadri di tratta, dorsali e gestione delle lampade di illuminazione delle vie di esodo e descritto il sistema innovativo a sorgenti LED con schemi di collegamento e connessioni.

Infine nel **decimo e ultimo capitolo** è stata realizzata un'analisi comparativa tecnico-economica degli impianti di illuminazione; in particolare fra il sistema attualmente in uso e il sistema innovativo a sorgenti LED, nelle sue varie tipologie di applicazione. Facendo quindi emergere gli aspetti positivi che portano questa nuova tecnologia a primeggiare nel campo dell'illuminazione di emergenza sono stati posti in evidenza gli indiscussi vantaggi a livello economico, di consumi e di tutela ambientale.

Capitolo 1

Normativa

1.1 Requisiti DM [28-10-05] e STI

Le normative che regolano la sicurezza nelle gallerie ferroviarie sono il Decreto Ministeriale 28-10-05 (DM [28-10-05]) e la Specifica Tecnica di Interoperabilità (STI).

Il DM 28-10-05 ha lo scopo di assicurare un livello adeguato di sicurezza nelle gallerie ferroviarie, esso si sviscera in 15 Articoli e quattro Allegati.

Sinteticamente esso recepisce e integra le misure originariamente previste dalle Linee guida per il miglioramento della sicurezza nelle linee ferroviarie emanate da FS nel 1997 per le gallerie di lunghezza superiore a 5 km fornendo i criteri per l'analisi quantitativa dei rischi in galleria in una logica di sistema treno-galleria.

Prescrive:

- I requisiti minimi di sicurezza per l'infrastruttura e per il materiale rotabile che, se non posseduti, devono essere oggetto di un piano di interventi;
- l'analisi di rischio a cura di un soggetto terzo o funzionalmente indipendente dal Gestore dell' Infrastruttura;

Introduce le figure di Responsabile di Galleria e Responsabile della Sicurezza;

Istituisce:

- procedure per l'adeguamento, modulato nel tempo, delle gallerie in progettazione (art. 9), in costruzione (art. 10) e in esercizio (art. 11);
- la Commissione di Sicurezza che, in coerenza con il DM, esprimere parere sulla conformità della Documentazione di Sicurezza

All'interno della sfera "sicurezza in galleria" si individuano le indicazioni riguardo un adeguato sistema d'illuminazione volto alla *facilitazione dell'esodo*: allegato II, punto 1.3.

Si rimanda all'*Allegato A* per una conoscenza più approfondita di tale decreto.

Con la STI la Commissione adotta una Specifica Tecnica di Interoperabilità relativa alla «Sicurezza nelle gallerie ferroviarie» del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale, in conformità dell'articolo 6, paragrafo 1, della direttiva 2001/16/CE e del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità in conformità dell'articolo 6, paragrafo 1 della direttiva 96/48/CE [...].

Ai sensi dell'articolo 5, paragrafo 3 della direttiva 2001/16/CE, modificata dalla direttiva 2004/50/CE, la presente STI:

- a) indica il campo di applicazione (parte della rete o materiale rotabile di cui all'allegato I della direttiva; sottosistema o parte di sottosistema di cui all'allegato II della direttiva) -capitolo 2;
- b) precisa i requisiti essenziali per il sottosistema e le sue interfacce verso gli altri sottosistemi -capitolo 3;
- c) definisce le specifiche funzionali e tecniche che il sottosistema e le sue interfacce devono rispettare in relazione ad altri sottosistemi. Se necessario, tali specifiche possono variare a seconda dell'utilizzazione del sottosistema, ad esempio a seconda delle categorie di linee, nodi e/o materiale rotabile di cui all'allegato I della direttiva — capitolo 4;
- d) determina i componenti di interoperabilità e le interfacce che devono essere oggetto di specifiche europee, tra cui le norme europee, che sono necessari per realizzare l'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale — capitolo 5;
- e) indica, in ogni caso previsto, le procedure di valutazione della conformità o dell'idoneità all'impiego. Ciò include in particolare i moduli, definiti nella decisione 93/465/CEE o, se del caso, le procedure specifiche da seguire, per valutare la conformità o l'idoneità all'impiego dei componenti di interoperabilità, nonché la verifica «CE» dei sottosistemi — capitolo 6;
- f) indica la strategia di applicazione della STI. In particolare, è necessario specificare le tappe da superare per passare gradualmente dalla situazione attuale alla situazione finale di conformità generalizzata alla STI — capitolo 7;
- g) indica, per il personale interessato, i requisiti di qualifica professionale richiesti per l'esercizio del sottosistema in oggetto, nonché per l'attuazione della STI — capitolo 4.

Si rimanda all'*Allegato B* per maggiori dettagli a riguardo.

Dallo studio del materiale normativo fornito dalla società Italferr a riguardo della sicurezza nelle gallerie ferroviarie, si è dedotto che i due documenti in alto differiscono di poco nei contenuti a noi spettanti.

Riferendoci, infatti, solo all'applicazione pratica di uno studio di illuminazione di sicurezza in lunghe gallerie ferroviarie, i requisiti normativi, estrapolati dalle precedenti, si possono sintetizzare in:

- Strutturali (DM: allegato II, voce 1.3.1/1.3.2; STI: 4.2.2.7):
 - Marciapiede, ad altezza non inferiore al piano del ferro, di larghezza non inferiore a 90cm e con spazio libero minimo al di sopra del marciapiede di 2.25m.
 - Obbligatorio un corrimano posto ad altezza di circa 1m.
- Ottici (DM: allegato II, voce 1.3.4; STI: 4.2.2.8):
 - Un impianto di illuminazione che garantisca 5 lux medi ad un piano di altezza 1m dal piano di calpestio e comunque assicuri 1 lux minimo sul piano di calpestio.
 - Il posizionamento delle luci deve essere al di sopra del marciapiede, più in basso possibile, in modo da non interferire con lo spazio libero per il passaggio delle persone o inserite nel corrimano.
- Elettrici (DM: allegato II, voce 1.2.1/1.2.2; STI: 4.2.3.3/4.2.3.4/4.2.3.5):
 - L'Autonomia e l'affidabilità deve essere garantita dall'alimentazione elettrica per l'emergenza o per altre necessità assicurando una disponibilità di almeno 90 minuti. Se la luce di emergenza è spenta durante le normali condizioni di esercizio, deve essere possibile accenderla manualmente dall'interno della galleria ad intervalli di 250 m e/o da parte del responsabile della galleria utilizzando un comando a distanza.
 - Gli impianti di alimentazione elettrica a servizio dei dispositivi di emergenza devono prevedere opportune configurazioni o ridondanze per garantire, in caso di guasto singolo, la sola perdita di brevi tratti di impianto di galleria (non superiori a 500 metri).
 - Tutto il materiale elettrico non meccanicamente protetto deve avere caratteristiche di bassa infiammabilità, bassa propagazione di incendio, bassa tossicità e bassa densità di fumo.

Si può quindi andare a studiare una soluzione alternativa a quella esistente, cercando di ottimizzare i parametri fotometrici e andandone ad estrarre un vantaggio economico in termini di risparmio energetico e di materiale elettrico, manutenzione e minor impatto ambientale.

Capitolo 2

L'elemento illuminante: la tecnologia LED

Un LED è per definizione un diodo che emette luce (Light Emitting Diode).

Un diodo è un dispositivo elettronico a due terminali che consente il passaggio di corrente elettrica in una sola direzione, con l'entità della corrente che dipende dalla differenza di potenziale ai capi del dispositivo.

Dal punto di vista fisico, un LED è un chip di materiale semiconduttore impregnato o drogato con impurità per formare una giunzione positivo-negativo (PN): il polo positivo di tale giunzione è chiamato anodo, quello negativo catodo. La caratteristica principale di questi dispositivi è quella di lasciarsi attraversare dalla corrente in un solo verso, come un normale diodo, al quale si aggiunge la capacità di emettere luce.

In *Fig. 2.1* è rappresentato il simbolo circuitale del diodo, che ne esprime la funzione: il triangolo indica la direzione che permette il flusso di corrente elettrica, mentre la sbarra ne indica il blocco; le frecce indicano che il diodo emette luce. Avendo un terminale positivo ed uno negativo, il LED può essere inserito nel circuito elettrico in un solo senso.

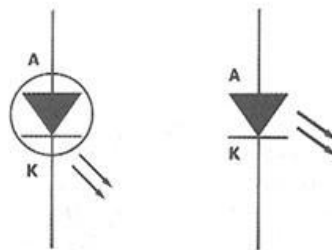


Fig.2.1 - Simbolo circuitale LED

Per comprendere il funzionamento del LED, è necessario analizzare al livello microscopico la struttura dei materiali e in particolare chiarire alcuni concetti legati alla capacità di condurre elettricità da parte degli stessi. Nel seguente capitolo verrà inoltre analizzato il funzionamento dei LED dal punto di vista ottico, la potenza emessa e i fattori che ne influenzano la qualità.

2.1 Principio di funzionamento e componenti del LED

In linea di principio i LED sono costituiti da materiale semiconduttore con specifiche proprietà elettro-ottiche tali da permettere la conversione diretta dell'energia elettrica in luce.

Alla base del funzionamento dei LED c'è la giunzione PN.

La giunzione PN è una particolare struttura che viene realizzata introducendo delle impurità nella struttura cristallina del *wafer* di semiconduttore di partenza, tali da variare le sue concentrazioni di atomi accettori N_A e donatori N_D .

Si ottiene un semiconduttore:

- di tipo P, caratterizzato da una concentrazione di atomi $N_A > N_D$; drogando il wafer di partenza con sostanze trivalenti (principalmente gallio, boro, alluminio).
Si hanno lacune come portatori maggioritari mentre elettroni come portatori minoritari.
- di tipo N, con una concentrazione di atomi $N_D > N_A$; introducendo sostanze pentavalenti (come fosforo, arsenico, antimonio).
Si hanno elettroni come portatori maggioritari e lacune come portatori minoritari.

All'atto della formazione della giunzione di una barretta di semiconduttore di tipo P con una di semiconduttore di tipo N si verifica uno spostamento di cariche: gli atomi che hanno acquisito per ricombinazione un elettrone sono diventati ioni negativi, mentre quelli che hanno acquisito una lacuna (perso un elettrone) sono diventati ioni positivi.

Tale zona, quindi, risulta essere priva di cariche libere, poiché si neutralizzano e si denomina come "zona di svuotamento" (*depletion zone o SCR*) Fig.2.2; essa presenta una certa carica negativa dal lato P e una positiva dal lato N.

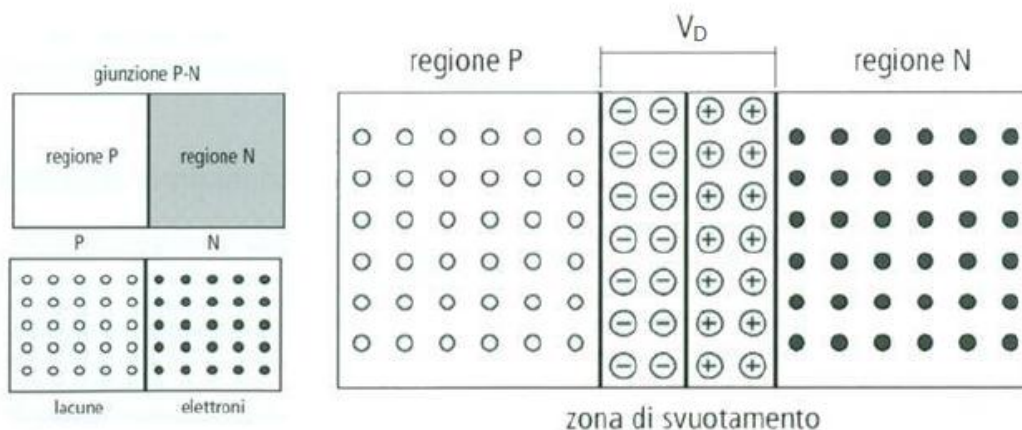


Fig.2.2 - Giunzione PN all'equilibrio termodinamico e zona di svuotamento

Tale zona si presenta come una porzione di dielettrico e determina un effetto capacitivo ai capi della giunzione. Il processo di diffusione dei portatori determina pertanto un campo elettrico attraverso la

zona di carica spaziale, che si oppone ad un'ulteriore diffusione di portatori di carica maggioritari e favorisce un flusso di cariche minoritarie in senso opposto.

Il altre parole, il campo elettrico costituito induce un potenziale intrinseco che tende a confinare elettroni e lacune al di fuori della SCR; tale potenziale V_D (detto tensione di diffusione) è dato da:

$$V_D = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

Dove:

- N_A e N_D sono le concentrazioni degli atomi accettori e donatori, rispettivamente nella regione P ed N;
- n_i è la concentrazione intrinseca (densità degli elettroni liberi) del semiconduttore [cm^{-3}]
- K è la costante di Boltzmann [$1,38 \times 10^{-23}$ J/K];
- q è la carica dell'elettrone [$1,60 \times 10^{-19}$ C];
- T temperatura di funzionamento [K]
- V_T è la tensione termica ($\frac{KT}{q}$) [V].

Oltre alla corrente di diffusione, si creerà anche una corrente di deriva (*drift*) dovuta al campo elettrico che si stabilisce ai capi della giunzione; essa è costituita essenzialmente dai portatori di carica minoritari (elettroni verso destra e lacuna verso sinistra) che si formano per effetti termici. Si raggiunge l'equilibrio quando la corrente di diffusione dei portatori maggioritari viene equilibrata dalla corrente di deriva dei portatori minoritari (equilibrio termodinamico).

Polarizzando direttamente la giunzione, cioè applicando una differenza di potenziale (d.d.p.) positiva V tra regione P e N si abbassa la barriera di potenziale creata dalla SCR con una conseguente iniezione di portatori minoritari: elettroni dalla regione N alla P e lacune in senso opposto (*Fig.2.3*). Si ottiene così un flusso di corrente dalla zona P alla zona N.

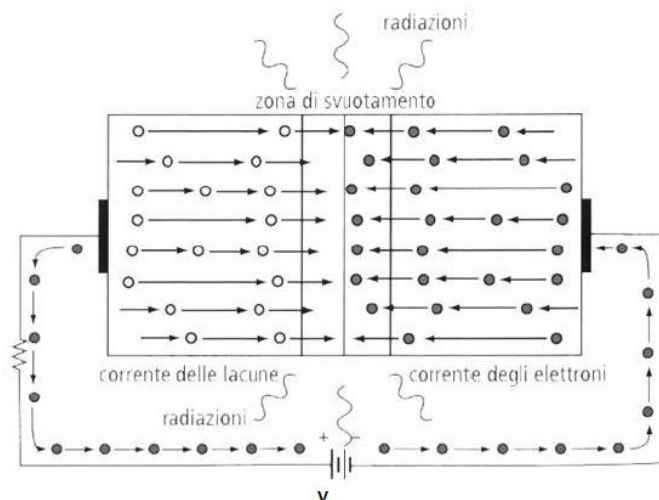


Fig.2.3 - Transito di elettroni (neri) e di lacune (bianche) con emissione di radiazioni

La caratteristica corrente – tensione (I – V) di una giunzione PN è data dalla Fig.2.4; si può esprimere la corrente diretta dall’anodo al catodo del diodo LED come:

$$I_F = I_S \left[\exp\left(\frac{qV_F}{nKT}\right) - 1 \right]$$

Dove:

- I_S è la corrente di saturazione inversa del diodo [A];
- V_F è la tensione di polarizzazione diretta applicata da una batteria al diodo LED [V];
- n è il fattore di idealità che assume valore unitario per un diodo ideale;
- K è la costante di Boltzmann [$1,38 \times 10^{-23}$ J/K];
- q è la carica dell'elettrone [$1,60 \times 10^{-19}$ C];
- T temperatura di funzionamento [K].

Dalla formula si deduce la correlazione fra corrente circolante nel diodo LED e la temperatura; proprio per questo effetto, come si vedrà in seguito, saranno adottate delle contromisure per cercare di mantenere le variazioni di temperatura entro un piccolo range, attraverso una dissipazione efficiente del calore. A sua volta anche la tensione V_F , corrispondente ad un certo valore della corrente diretta, diminuisce al crescere della temperatura con un coefficiente termico negativo.

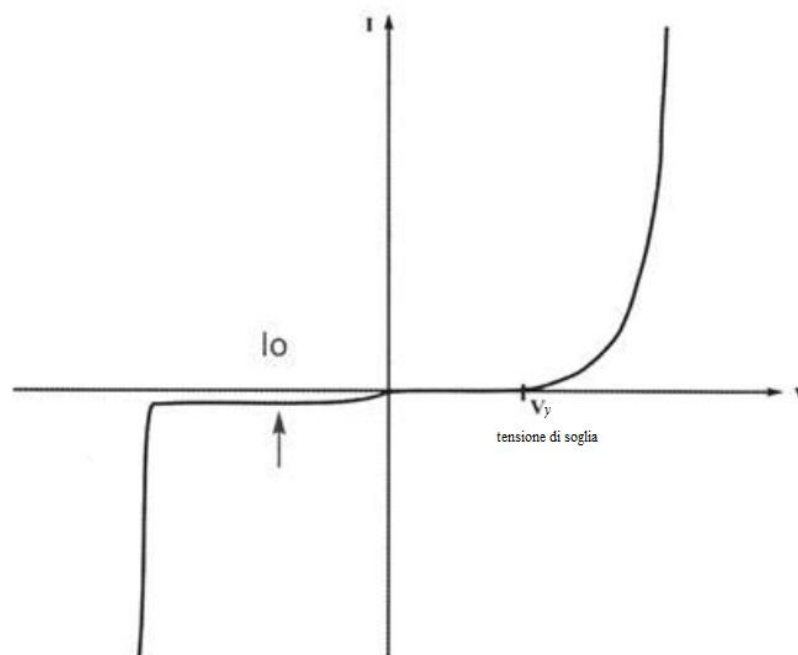


Fig.2.4 - Caratteristica I-V diodo LED

Occorre notare che, per V_F compreso fra 0 e V_y rappresenta la tensione di soglia oltre la quale la corrente diretta I_F assume valori apprezzabili. Come si può intuire le caratteristiche della giunzione, quindi i valori di V_y , variano a seconda dei materiali utilizzati; in Fig.2.4, sono riportate caratteristiche (I-V) per diversi materiali alla temperatura di circa 22°C, mentre in Fig.2.5 ne è

illustrata la relazione tra tensione di polarizzazione diretta ed energia del divario di banda (*bandgap*).

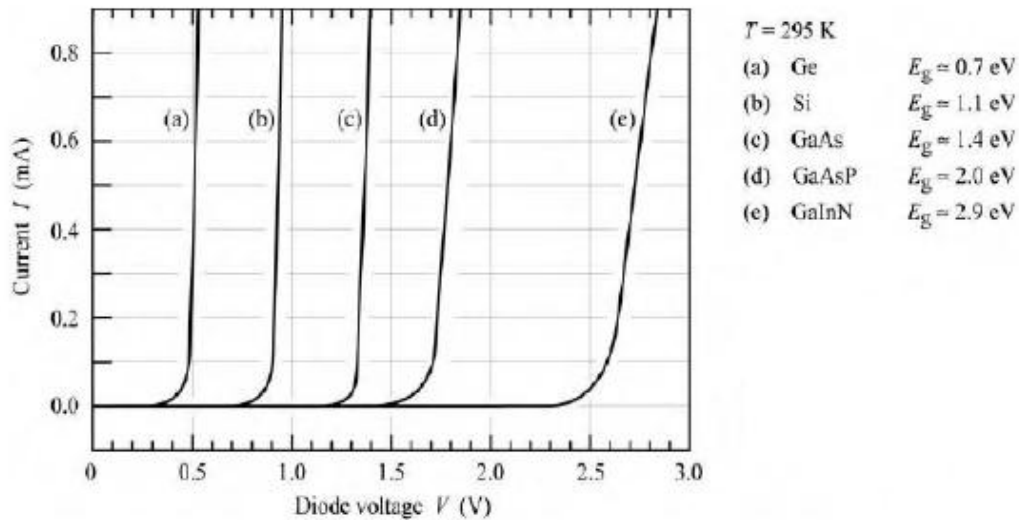


Fig.2.5 - Caratteristica I-V a temperatura di circa 22°C di giunzioni PN di diversi semiconduttori

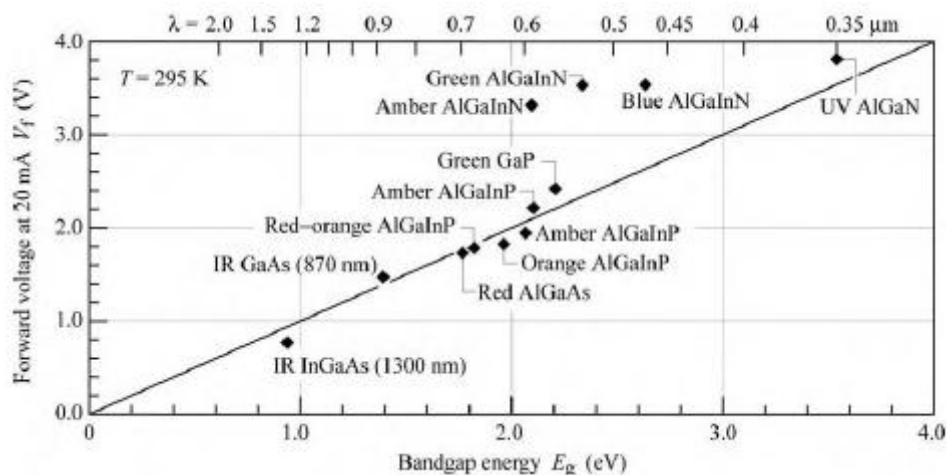


Fig.2.6 - Tensione di polarizzazione diretta ed energia di bandgap per LED di diversi materiali

All'interno della giunzione avvengono continuamente fenomeni di generazione e di ricombinazione di coppie elettrone-lacuna.

Nella generazione, gli elettroni vengono promossi in banda di conduzione tramite iniezione di portatori o per illuminazione della giunzione (assorbimento), creando così una coppia elettrone - lacuna.

In pratica, l'energia dei portatori iniettati nella giunzione permette agli elettroni di portarsi in banda di conduzione ad un livello energetico superiore lasciando in banda di valenza una lacuna.

La ricombinazione quindi porta ad un decadimento dell'energia propria dell'elettrone; questo comporta l'emissione di energia (di tipo termico nei normali diodi) e di tipo termico luminoso nei LED.

Il fenomeno fisico è perciò responsabile dell'emissione luminosa in seguito all'eliminazione di una coppia elettrone-lacuna. In questo caso l'elettrone in banda di conduzione torna in banda di valenza cedendo la sua energia sotto forma di un fotone (*Figura 2.7*).

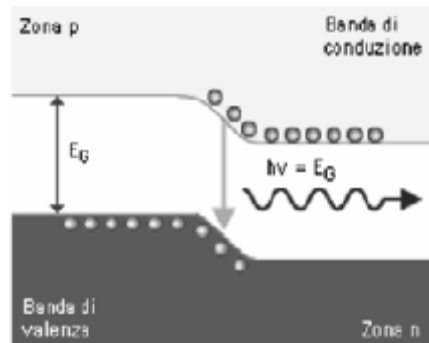


Fig.2.7 - Processo di ricombinazione

Definiamo quindi elettroluminescenza il fenomeno in cui i fotoni sono prodotti dalla ricombinazione degli elettroni e delle lacune nella giunzione P-N.

L'emissione di luce nei LED è dovuta appunto al fenomeno dell'elettroluminescenza; la luce di queste sorgenti è detta anche illuminazione allo stato solido (*Solid State Lighting - SSL*) proprio perché è un corpo solido che emette luce.

L'energia del fotone emesso è strettamente legata al materiale con cui è realizzato il semiconduttore e, idealmente, è pari al salto effettuato dall'elettrone (bandgap del semiconduttore):

$$E_g = h\nu = hc/\lambda$$

E_g rappresenta quindi il valore minimo dell'energia [eV] necessaria a rompere un legame covalente e liberare un elettrone

Dove:

- h è la costante di Plank ($6,626 \times 10^{-34}$ Js);
- ν è la frequenza di radiazione;
- λ la lunghezza d'onda della radiazione;
- c la velocità della luce (3×10^8 m/s).

Come si può notare, la lunghezza d'onda della radiazione emessa dipende dal materiale utilizzato ed è strettamente dipendente dall'energia dell'elettrone emesso, causa per cui il LED idealmente emette luce monocromatica di lunghezza d'onda costante.

Nella realtà l'efficienza (luminosa) è ridotta perché non tutte le combinazioni elettrone-lacuna causano l'emissione di un fotone e lo spettro è allargato perché gli elettroni che si ricombinano non hanno tutti la stessa energia.

Si vedrà nel seguito come l'intensità dell'emissione aumenta all'aumentare della corrente diretta e al mantenendo un valore non elevato di temperatura.

Valori tipici della corrente diretta del diodo I_D (per LED tradizionali) sono compresi fra 5 e 30mA con tensioni dirette V_F superiori a 1.5V.

2.1.1 Il Chip

Il *wafer* di semiconduttore su cui viene ricavata la giunzione prende il nome di *chip* (o *die*), la cui struttura può variare molto in base ai materiali usati e alla funzione che dovrà svolgere il LED.

La zona del chip dove avviene l'emissione luminosa si chiama "zona attiva".

I due substrati più utilizzati per la realizzazione dei LED sono carburo di silicio e zaffiro.

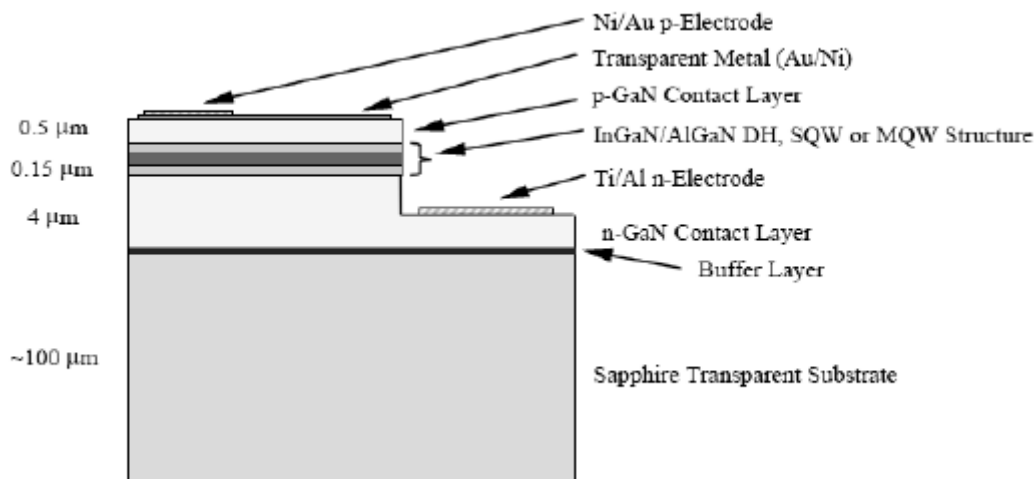


Fig.2.8 - Schema di chip LED InGaN su substrato di zaffiro

Un LED costruito su zaffiro ha struttura orizzontale: i due contatti sono posti sulla faccia superiore del dispositivo e sopra il substrato è presente uno strato *buffer*, in genere GaN o AlGaN con alluminio in bassa concentrazione. Di seguito c'è uno strato di n-GaN relativamente spesso e generalmente drogato con silicio, a cui segue la zona attiva composta di strati di InGaN non drogato e strati di GaN nel caso di LED in InGaN (Fig. 2.8). Sopra la zona attiva si trova uno strato di AlGaN di tipo P ad alta concentrazione di alluminio con funzione di confinare gli elettroni nella zona attiva. Infine è presente uno strato di GaN di tipo P sul quale si pone il contatto metallico.

Quest'ultimo può avere varie forme e recentemente sono stati impiegati contatti speciali a griglia con lo scopo di distribuire meglio la corrente nel chip rendendo più uniforme la densità di corrente e sfruttando tutta la superficie della zona attiva.

2.1.1.1 Materiali utilizzati per la realizzazione del Chip

La lunghezza d'onda della luce emessa dalla giunzione P-N dipende direttamente dal gap energetico del semiconduttore utilizzato; nello spettro della luce visibile, compreso tra 380 e 740 nm, tra i colori tipici di luce emessa da un LED vi sono il rosso, l'arancio, il giallo, il verde e in questi ultimi anni il bianco, appunto, per usi illuminotecnici.

In base alla relazione:

$$\lambda = hc/E_g$$

si può notare che la lunghezza d'onda delle radiazioni emesse è inversamente proporzionale al bandgap del semiconduttore utilizzato:

- a bandgap bassi (silicio e germanio) corrispondono lunghezze d'onda alte nella zona dell'infrarosso;
- a bandgap alti corrispondono lunghezze d'onda basse nella zona dell'ultravioletto.

Per ottenere lunghezze d'onda tali che la radiazione elettromagnetica diventi luce visibile è necessario realizzare le giunzioni di materiali semiconduttori specifici e differenziati in base alla radiazione desiderata.

I composti sostanzialmente utilizzati finora sono i seguenti:

- Arseniuro di gallio (GaAs): LED a luce rossa scura;
- Arseniuro di gallio e alluminio (GaAlAs): LED a luce rossa in varie tonalità;
- Fosforo e arseniuro di gallio (GaAsP): LED a luce arancione e gialla;
- Fosforo di gallio e alluminio (GaAlP): LED a luce verde;
- Nitruro di gallio (GaN): LED a luce verde scuro e blu;
- Nitruro di gallio e indio (InGaN): LED a luce blu (possibilità di produrre bianco);
- Seleniuro di zinco (ZnSe): LED blu;
- Carburo di silicio (SiC): LED a luce blu (possibilità di produrre bianco).

I primi diodi ad emissione luminosa erano disponibili solo nel colore rosso; venivano utilizzati come indicatori nei circuiti elettronici, nei display a sette segmenti e negli opto-isolatori.

Successivamente ne vennero sviluppati alcuni che emettevano luce gialla e verde e vennero realizzati dispositivi che integravano due LED, generalmente uno rosso e uno verde, nello stesso contenitore permettendo di visualizzare quattro stati (spento, verde, rosso, verde+rosso=giallo) con lo stesso dispositivo.

I LED bianchi, dunque sono ottenuti usando come base i diodi a luce blu e inserendo nella struttura che li compone uno strato di materiale (fosfori gialli) in grado di convertire l'emissione blu in luce

bianca; infatti è praticamente impensabile produrre luce bianca con una semplice giunzione, in quanto essa è la somma di tutti i colori.

Il bianco si può ottenere anche con LED tricolori (RGB) ossia LED che contengono tre giunzioni; una che emette il rosso, una il verde e l'ultima il blu (Fig.2.9).

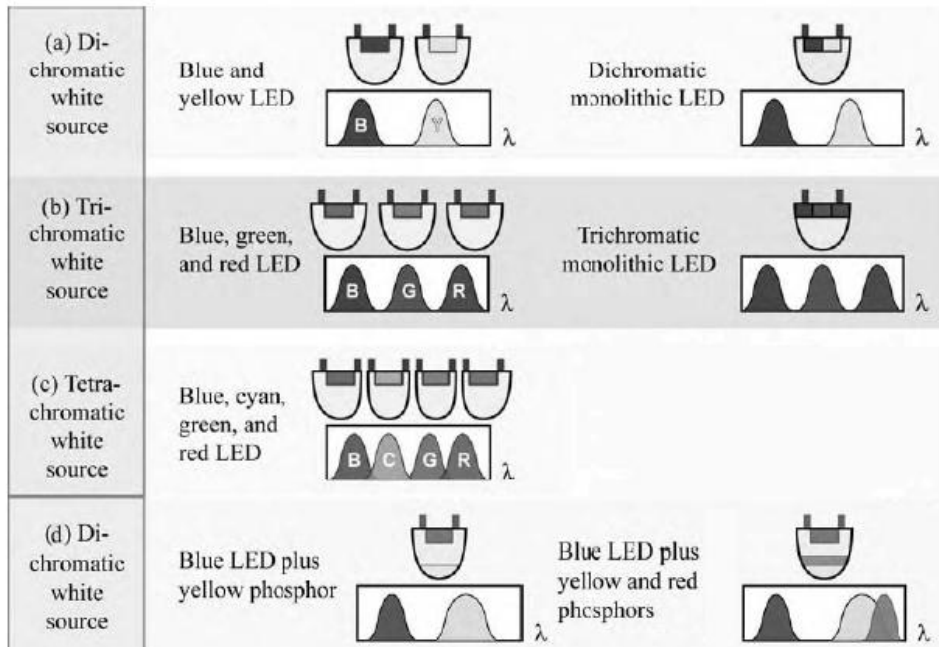


Fig.2.9 - Varie modalità di sintesi per ottenere luce eterocromatica

- a) Luce eterocromatica (bianca) per sintesi additiva di due colori complementari;
- b) Luce eterocromatica (bianca) per sintesi additiva di tre colori primari (RGB);
- c) Luce eterocromatica (bianca) per sintesi additiva di quattro – cinque colori;
- d) Luce eterocromatica (bianca) per conversione delle lunghezze d'onda.

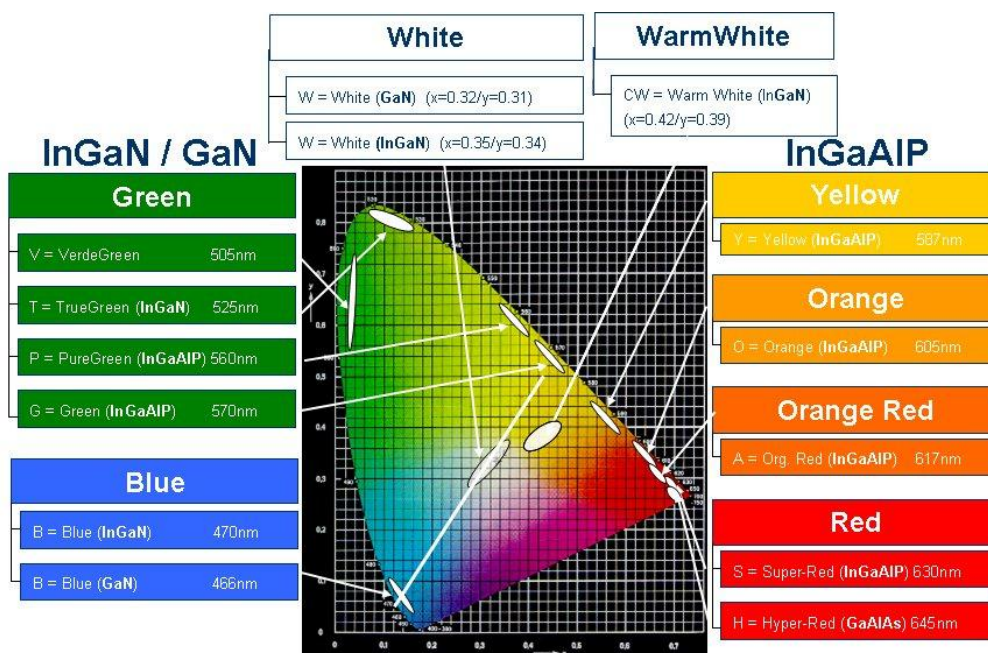


Fig.2.10 - Diagramma Lxy e posizionamento colori

2.1.2 Il Package

È da precisare che il *wafer* di semiconduttore su cui viene ricavata la giunzione (*chip*) è inservibile ai fini dell'emissione luminosa in quanto necessita di un "involucro" esterno fornito degli appositi elementi ottici.

È appunto questo il "Package".

Tutti i LED quindi sono montati in questo involucro che fornisce due contatti elettrici (anodo e catodo), degli elementi ottici in grado di dirigere il flusso luminoso in una ben determinata direzione e (soprattutto nel caso di PowerLED) di un adeguato sistema di dissipazione termica.

Il materiale d'incapsulamento oltre ad essere ermetico e inerte, possiede un'alta trasparenza ottica, un alto indice di rifrazione e stabilità a temperature elevate.

Il package differisce in base alla tipologia di LED e alle loro caratteristiche. Possiamo classificare i LED attualmente disponibili sul mercato in tre categorie:

- LED THT (*Through Hole Technology* – LED tradizionale)
- LED SMD (*Surface Mounting Device*)
- PowerLED

LED THT

Il package di un tipico LED THT (ossia tecnologia da foro) è raffigurato in figura (Fig. 2.11). Questo tipo di LED è protetto da una capsula tonda di materiale plastico di diametro 3 o 5mm, ed il loro uso principale è quello di spie luminose nei più svariati dispositivi elettronici.

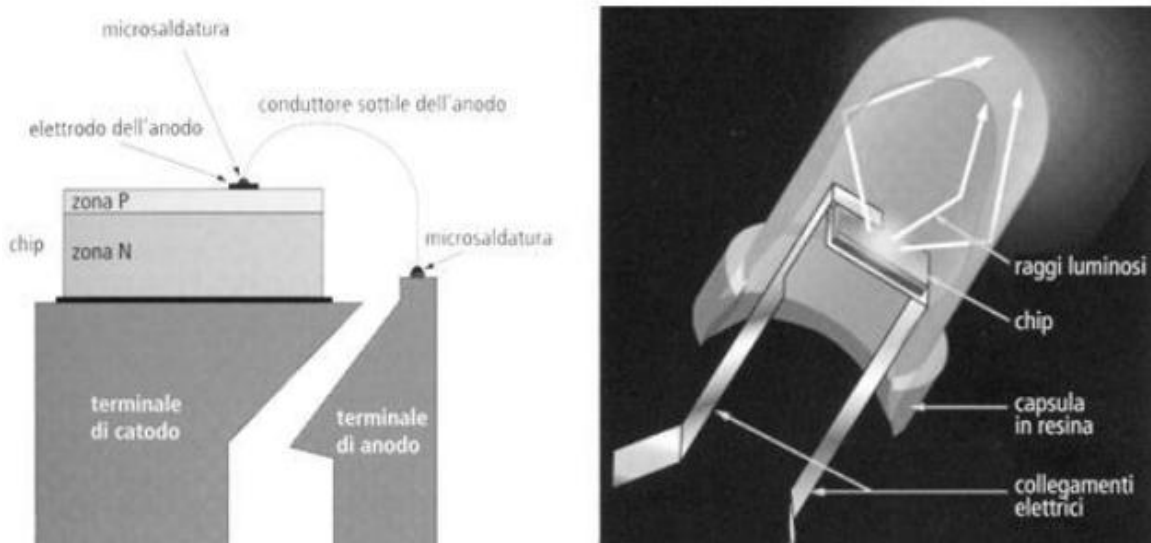


Fig.2.11 - Package di un tipico LED (THT)

Il chip è posizionato all'interno di una specie di "tazza" riflettente che ha il compito di riflettere e rifrangere le radiazioni luminose in modo che queste ultime siano concentrate nell'emisfero superiore dello spazio che circonda il LED. La tazza provvede anche a collegare il chip ad uno dei terminali elettrici (solitamente il catodo), mentre il collegamento all'anodo viene effettuato tramite un sottile filo d'oro.

LED SMD

I LED SMD consistono in una miniaturizzazione dei LED tradizionali THT.

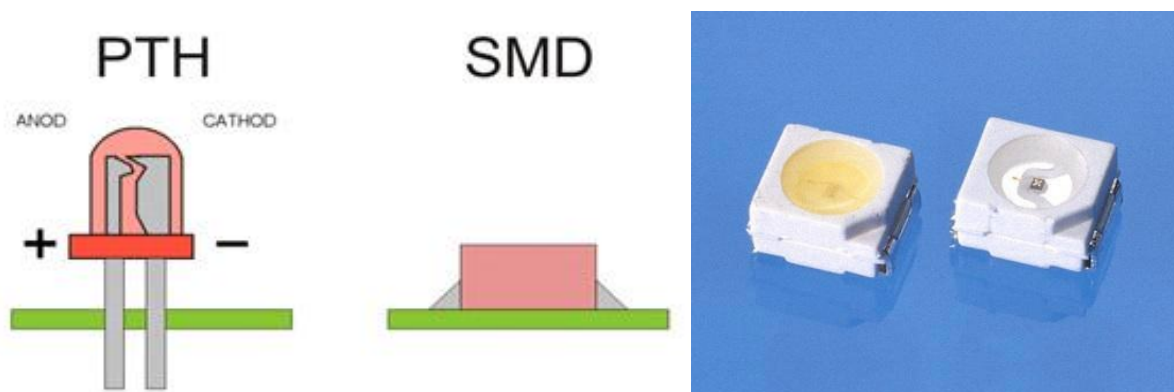


Fig.2.12 - Differenza fra LED THT e SMD; package di un tipico LED (SMD)

I LED di questo tipo si installano in circuiti montati su una base isolante quale una scheda elettronica o un circuito stampato.

Questi circuiti normalmente sono forati per consentire il passaggio degli elettrodi, le cui saldature sono effettuate sulla faccia inferiore della base.

In questo caso, i LED SMD sono componenti in cui gli elettrodi non sporgono verso il basso, ma escono dai lati del chip; essi si contraddistinguono per la forma piatta, in modo tale la parte inferiore può essere appoggiata su una base, mentre i collegamenti elettrici sono laterali.

Il LED SMD è dunque saldato sulla parte esterna della scheda senza che i due piedini (anodo e catodo) ci debbano passare attraverso.

In questo modo è possibile utilizzare circuiti stampati su base isolante di ridotto spessore ed effettuare le microsaldature con macchinari automatizzati (robot).

Questo tipo di LED si presenta come un minuscolo box con una faccia da cui viene emessa la luce, la faccia opposta o laterale che funge da base d'appoggio, mentre le rimanenti facce laterali sono munite di anodo e catodo.

Questa tipologia di LED è prevalentemente usata in circuiti in miniatura e sono una categoria importante perché hanno un'efficienza luminosa molto elevata (1-11lm/W), ragion per cui si è pensato di impiegarli anche nella realizzazione di apparecchi LED per l'illuminazione generale.

PowerLED

Il PowerLED è un particolare tipo di LED le cui caratteristiche principali sono quelle di avere una gamma di potenze di funzionamento nettamente superiore alle precedenti categorie e di essere, come dice il nome stesso, particolarmente brillante.

Il package di un PowerLED differisce leggermente dai package dei LED SMD: le facce laterali sono munite di anodo e catodo per l'alimentazione elettrica, il cui percorso, differisce da quello termico diretto dal chip al dissipatore di calore (Fig.2.13).

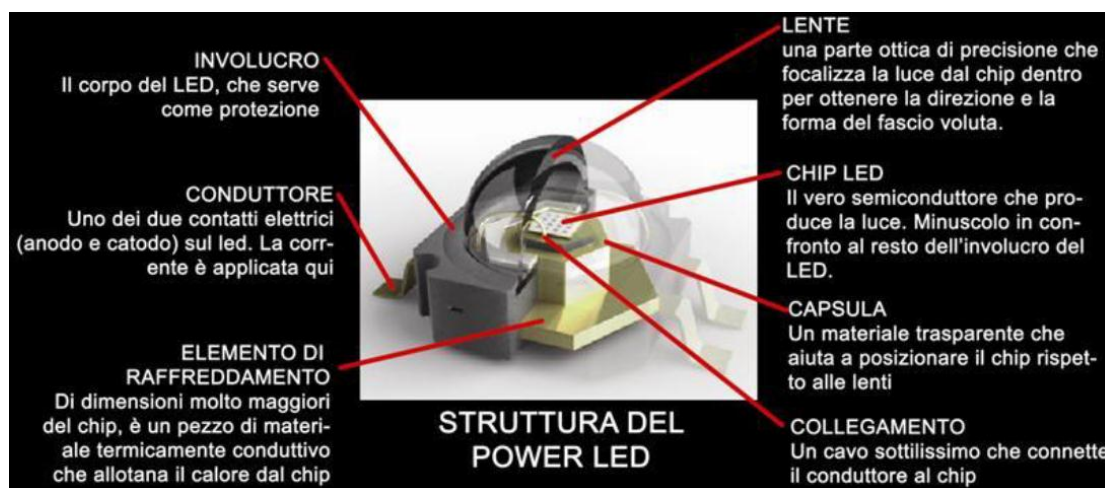


Fig.2.13 - Package di un PowerLED

Il chip del LED è collegato ad un dissipatore a piastrina metallica con resistività termica bassa che fornisce il percorso termico primario mentre i collegamenti anodo e catodo avvengono sempre attraverso due sottili fili d'oro.

Il semiconduttore utilizzato è sempre quello sintetico tipico della colorazione da realizzare: per ottenere forti correnti si gioca sul drogaggio, ossia sulla densità di atomi droganti introdotti nel reticolo cristallino, oltre che sulla dimensione della giunzione (il *chip* di un PowerLED è più grande di quello di quello dei LED visti in precedenza).

La resistenza termica del package del LED insieme alla temperatura massima di funzionamento determina la massima potenza che può essere dissipata nel package stesso.

La massima temperatura di funzionamento può essere determinata dalle considerazioni di affidabilità, dalla degradazione dell'incapsulamento e dalle considerazioni in materia di efficienza quantica interna.

Nel corso dell'elaborato verranno utilizzati LED di tipo SMD e PowerLED. In entrambi i casi si adopereranno sottodimensionati; ossia non lavoreranno alla massima potenza, per non raggiungere elevate temperature di funzionamento, diminuendo così le caratteristiche e la vita del componente.

Si assicurerà in questo modo un funzionamento superiore alle 100.000 ore.

2.2 Caratteristiche ottiche ed elettriche dei LED

Si prenderanno in considerazione gli spettri delle emissioni ottiche di diversi LED (Fig.2.14): uno rosso AlGaInP, uno verde GaInN e uno blu GaInN. Confrontandoli si nota che il LED verde ha uno spettro di emissione più largo sia del LED blu, sia di quello rosso, a causa dei limiti tecnologici nella fabbricazione di substrati di GaInN ricchi di Indio.

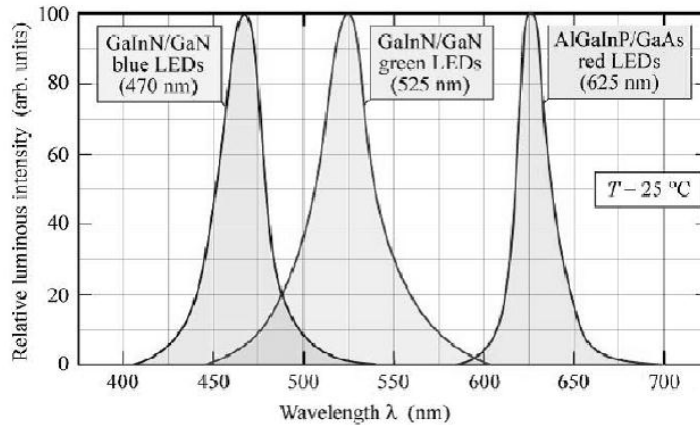


Fig.2.14 - Spettro di emissione di LED blu, verdi e rossi a temperatura ambiente 25°C

In Fig.2.15 è riportato il grafico dell'intensità luminosa in funzione della corrente circolante per gli stessi tre LED; in un LED ideale la caratteristica dovrebbe essere lineare con pendenza unitaria come indicato dalla linea tratteggiata sul grafico.

Il LED rosso AlGaInP ha una caratteristica con pendenza molto vicina a quella ideale mentre i LED GaInN (verde e blu) hanno caratteristiche poco lineari e con pendenze decisamente inferiori a uno. In particolare il LED verde è quello che più si allontana dalle condizioni ideali a confermare il fatto che il materiale GaInN è di qualità troppo bassa, in particolare con alte concentrazioni di Indio.

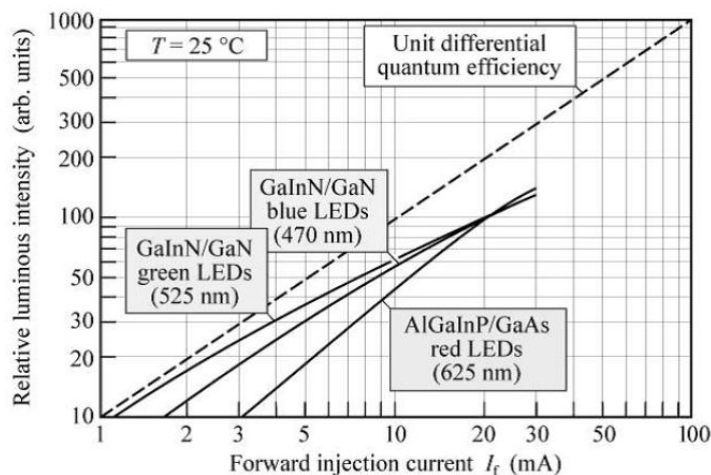


Fig.2.15 - Andamento dell'intensità luminosa in funzione della corrente di iniezione a temperatura ambiente 25°C

La dipendenza della potenza ottica emessa dalla temperatura è mostrata in Fig.2.16.

Si nota che la potenza ottica ha una dipendenza dalla temperatura molto meno marcata nei LED GaInN rispetto al LED rossi AlGaInP.

- In primo luogo, la barriera di potenziale che confina i portatori è più alta nei sistemi basati su GaInN/GaN e quindi l'effetto della diminuzione del band gap a causa dell'aumento di temperatura è meno marcato. Risentono meno dell'aumento di temperatura.
- In secondo luogo l'AlGaInP con l'aumentare della temperatura è caratterizzato dall'aumento dei fenomeni di ricombinazione non radiativa (fenomeni con assenza di emissione di fotoni) che ne diminuiscono l'efficienza radiativa.

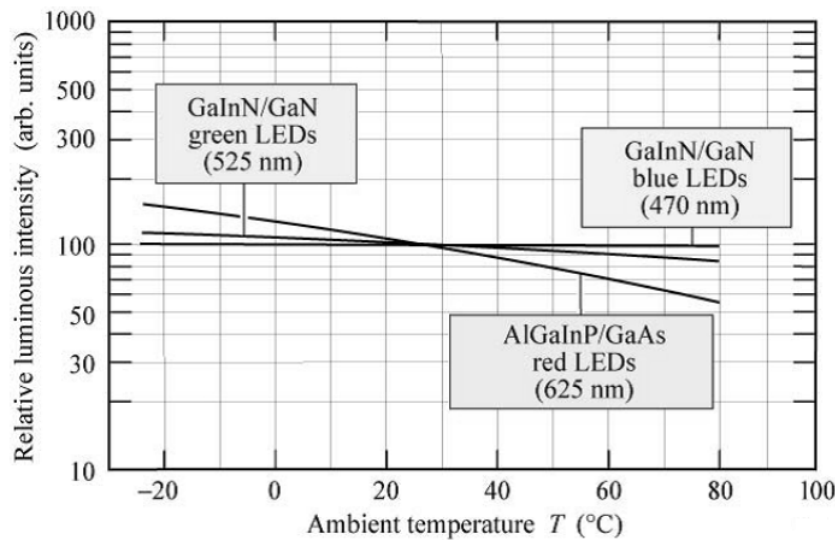


Fig.2.16 - Andamento della potenza ottica in funzione della temperatura ambiente

La Fig.2.17 mostra la caratteristica (I-V) dei tre LED polarizzati direttamente: GaInN blu, GaInN verde e AlGaInP rosso.

Si nota come la tensione diretta V_F (per l'esattezza proprio la tensione di soglia V_y) a cui il diodo comincia a condurre aumenti all'aumentare dell'energia di emissione, cioè è più alta per i LED che emettono su lunghezze d'onda inferiori.

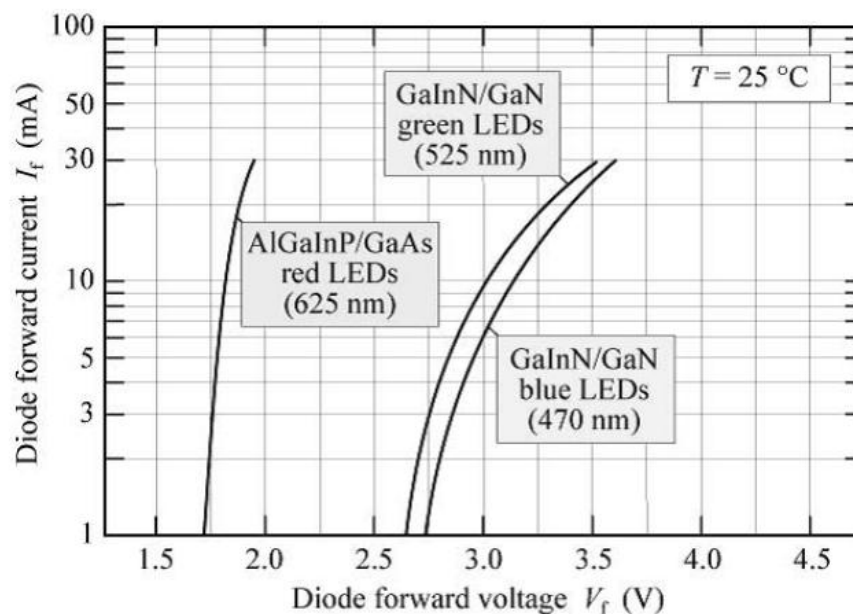


Fig.2.17 - Andamento caratteristica I-V di LED blu, verde, rosso a temperatura ambiente (25°C)

La Fig.2.18 indica la dipendenza dalla temperatura della tensione a una corrente iniettata di 30 mA. Per tutti i diodi la tensione diretta V_F decresce all'aumentare della temperatura e la causa è il calo del gap energetico.

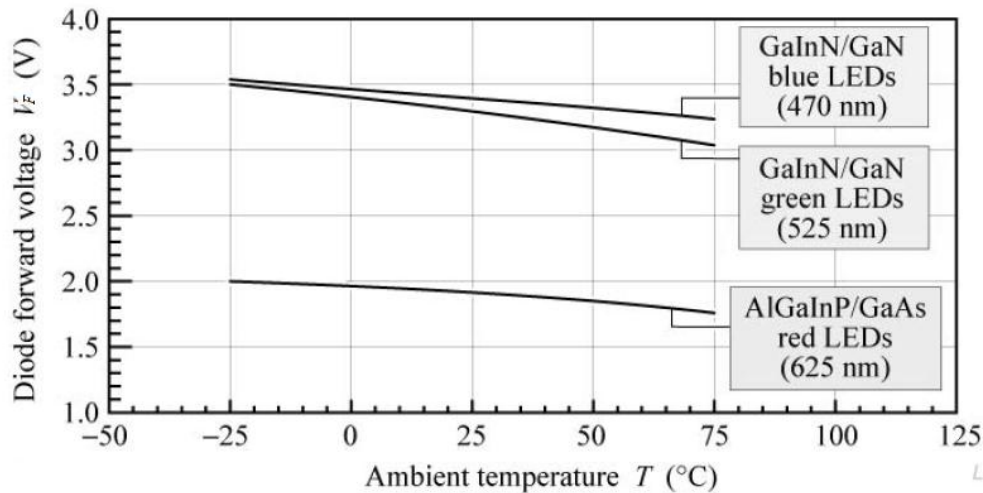


Fig.2.18 - Andamento della tensione di polarizzazione in funzione della temperatura a corrente costante di 30mA

2.3 Dissipazione termica

I LED e tutte le apparecchiature elettroniche sono molto sensibili al calore in quanto ne degrada prestazioni e durata di funzionamento, motivi per i quali è necessario eliminare ogni eccesso di calore attraverso dei sistemi di raffreddamento più o meno complessi.

Le sorgenti di illuminazione tradizionali come le lampadine ad incandescenza convertono una minima parte dell'energia assorbita in luce; dunque la maggior parte dell'energia viene dissipata sotto forma di calore e trasferita all'ambiente esterno per radiazione.

A differenza delle lampade ad incandescenza, nei LED il calore del chip viene trasferito per conduzione al dissipatore termico e successivamente per convezione dal dissipatore allo spazio circostante.

Conoscere la temperatura a cui si porta la giunzione dei LED è importante perché l'eccessivo riscaldamento causa la perdita di prestazioni e minore affidabilità; se il dispositivo raggiunge un'elevata temperatura durante il funzionamento provocherà una diminuzione dell'efficienza, la traslazione dello spettro e limitazioni in termini di vita del LED.

Generalmente possiamo sintetizzare che molti meccanismi di degrado dei dispositivi durante l'invecchiamento sono attivati termicamente.

Si è detto che una variazione di temperatura comporta delle variazioni delle proprietà elettriche ed ottiche del LED; risulta perciò indispensabile una accurata caratterizzazione termica al fine di conoscere la reale temperatura di funzionamento in condizioni normali, nonché un sistema di dissipazione termica efficiente e quanto più economico.

Nel caso di LED SMD, dato le basse potenze di utilizzo (~100mW), si è riscontrato un aumento di temperatura trascurabile ai fini di una modificazione delle caratteristiche ottiche/elettriche.

Risulta sufficiente allo smaltimento del calore prodotto la struttura package stesso; la stringa di circuito stampato standard su cui verrà connesso feliciterà ancor più lo scambio termico verso l'esterno.

Un caso differente si presenta per i PowerLED; le potenze di utilizzo in questo caso risultano di maggiore entità (4W), producendo un riscaldamento potenzialmente pericoloso per la sua durata di vita.

Lo smaltimento del calore verso l'esterno (o verso un'altra superficie) viene in parte permesso dalla struttura del package del PowerLED tramite una piastrina metallica con resistività termica bassa e in parte tramite la connessione ad un circuito stampato ad anima metallica chiamato *Metal-Core-Printed-Circuit-Board (MCPCB)* Fig.2.19.

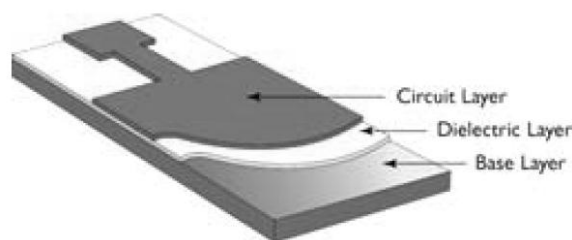


Fig.2.19 - Circuito stampato MCPCB

La scheda MCPCB funge da connessione elettrica, ma allo stesso tempo da interfaccia per la dissipazione termica, essa è costituita da:

- uno strato di rame per la realizzazione delle piste (circuito) di spessore che varia tra 35 e i 200µm;
- da uno strato di materiale detto di base (alluminio).
- da uno strato di materiale dielettrico per l'isolamento elettrico tra i due metalli.

I substrati termici MCPCB quindi, minimizzano l'impedenza termica e conducono il calore più efficacemente ed efficientemente che le schede stampate standard (le quali non possiedono il materiale base), infine sono meccanicamente più robusti.

2.4 Potenza ottica ed efficienza dei LED

La potenza ottica emessa da un LED può essere definita come il numero di fotoni emessi al secondo moltiplicato per la loro energia $h\nu$.

In condizioni ideali la regione attiva di un LED emette un fotone per ogni elettrone iniettato; si avrà quindi un'efficienza quantica interna η_{int} unitaria.

L'efficienza quantica interna η_{int} è definita come il rapporto tra il numero dei fotoni emessi dalla regione attiva in un secondo e il numero degli elettroni iniettati nel LED in un secondo.

Ricordando che l'energia di ogni fotone è pari a $h\nu$ possiamo scrivere l'efficienza quantica come:

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}/(h\nu)}{I_F/q}$$

Dove:

- P_{int} è la potenza ottica emessa;
- I_F è la corrente d'iniezione;
- q è la carica dell'elettrone.

Sempre considerando il LED ideale si parla di efficienza di estrazione η_{ext} per esprimere il fatto che tutti i fotoni emessi dalla zona attiva raggiungono lo spazio aperto:

$$\eta_{ext} = \frac{P/(h\nu)}{P_{int}/(h\nu)}$$

Dove P è la potenza ottica emessa in spazio aperto.

Nel caso di un LED reale, come è facilmente prevedibile, non tutti i fotoni emessi dalla regione attiva riescono a raggiungere lo spazio aperto; questo succede a causa di fenomeni di assorbimento interni (i fotoni emessi possono venire riassorbiti dal substrato) oppure in seguito a fenomeni di riflessione interna. Definiamo quindi, in base a quanto detto, l'efficienza quantica esterna come il rapporto tra il numero di fotoni emessi nello spazio aperto in un secondo e il numero di elettroni iniettati nel LED in un secondo:

$$\eta_{ext}' = \frac{P/(h\nu)}{I_F/q} = \eta_{int}\eta_{ext}$$

Infine l'efficienza in potenza è data dalla:

$$\eta_{pot}' = \frac{P}{I_F V_F}$$

definita come il rapporto tra la potenza ottica P e la potenza fornita al LED.

2.5 Alimentazione delle sorgenti LED

Un LED all'interno di un circuito si comporta come un carico a tensione costante, il cui valore dipende dal materiale e dalla temperatura a cui si trova il dispositivo.

Il materiale semiconduttore di cui è costituito il LED presenta una resistenza intrinseca che viene modellata come una resistenza ESR aggiuntiva (*equivalent series resistance*) posta in serie al diodo di valore inversamente proporzionale alla corrente di pilotaggio I_F del LED.

Ci sono due metodologie per pilotare un LED o una striscia di LED:

1. uso di regolatori lineari (con alimentazione a tensione costante) in grado di variare all'occorrenza la tensione e la corrente della sorgente di alimentazione. Utilizzato principalmente per fornire una corrente regolata ai LED SMD (o THT);
2. metodo basato sull'utilizzo di regolatori switching. Principalmente adoperato per fornire una corrente regolata a dispositivi più esigenti quali PowerLED.

Regolatori lineari con alimentazione a tensione costante

Pilotare un carico a tensione costante come una stringa di LED attraverso una sorgente a tensione costante è molto difficile, dato che l'unica differenza fra le due tensioni è la caduta di potenziale sulla resistenza ESR. Nel caso l'ESR sia di valore molto basso le due tensioni (fornita e richiesta) risultano quasi equivalenti, in modo che una leggera variazione di una delle due tensioni causa un'alta variazione nel valore della corrente come illustrato in *Fig. 2.20*.

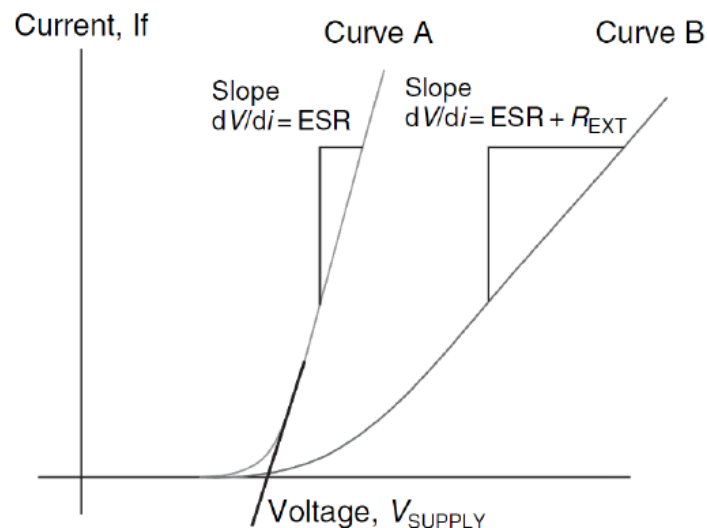


Fig.2.20 - Andamento della corrente del LED in funzione della tensione di alimentazione

Supponendo che siano conosciute le variazioni della tensione V e la tensione V_F la conseguente variazione di corrente può essere calcolata.

È da notare che trattandosi di componenti elettronici, la tensione V_F del LED è soggetta a tolleranza di fabbricazione ed è dipendente dalla temperatura di funzionamento, inoltre il generatore di

tensione V in genere ha una tolleranza del 5% che può salire a valori maggiori per alimentatori non stabilizzati.

Assumendo che il valore della resistenza ESR sia costante abbiamo:

$$I_{MIN} = (V_{MIN} - V_{FMAX}) / ESR$$

$$I_{MAX} = (V_{MAX} - V_{FMIN}) / ESR$$

Come si può notare dalle formule, se c'è una forte differenza fra le tensioni V_F e V e se il valore della resistenza ESR è elevato avremmo le correnti I_{MIN} e I_{MAX} del diodo di valori molto vicini, situazione che può essere sufficiente per pilotare un LED con correnti fino a 50mA.

Nel caso dei PowerLED una elevata caduta di tensione nella ESR sarebbe inaccettabile poiché renderebbe il dispositivo totalmente inefficiente e genererebbe problemi di dissipazione termica; tuttavia è anche vero che il valore dell'ESR cala con l'aumentare della potenza del LED.

Ad esempio un LED standard da 20mA ha un ESR di 20Ω, mentre un PowerLED con 350mA tipicamente ha una ESR di 1-2Ω.

La variazione di 1V nella tensione di alimentazione in un PowerLED può voler dire un aumento della corrente di 1A. Proporzionalmente la stessa situazione si presenta per LED tradizionali (THT o SMD) a bassa corrente; per tale motivo è necessario introdurre un sistema di controllo della corrente.

I due metodi usati per controllare il flusso di corrente in un sistema di illuminazione LED alimentato da un generatore a tensione costante sono: il controllo passivo e il controllo attivo.

Controllo passivo

Si può notare che mentre l'aumento della tensione V_F sposta la curva del grafico verso destra, la pendenza della curva è dovuta unicamente al valore della resistenza ESR: maggiore è il valore di quest'ultima minore sarà la pendenza della curva e quindi minore sarà la variazione di corrente a parità di variazione di V_F .

Per LED con correnti deboli una resistenza anche di valore elevato, posta in serie agli stessi, può essere utile per diminuire la pendenza della curva nel grafico I-V e quindi la variazione di corrente in seguito ad una variazione del valore di V_F .

Come fatto in precedenza è possibile calcolare i valori di I_{MIN} e I_{MAX} di un LED alimentato a tensione costante questa volta però con l'aggiunta di una resistenza in serie R_{EXT} di valore noto. Nelle equazioni sotto, la tensione del carico V_{LOAD} comprende la caduta di potenziale nella resistenza ESR.

$$I_{MIN} = (V_{MIN} - V_{LOADMAX}) / R_{EXT}$$

$$I_{MAX} = (V_{MAX} - V_{LOADMIN}) / R_{EXT}$$

Generalmente nei sistemi di illuminazione sono necessari più LED per fornire un fascio di luce sufficiente.

Un collegamento tipico è "l'array", ossia stringhe di circuito elettrico con LED collegati in serie.

Le stringhe fra loro sono collegate in parallelo elettrico, aventi perciò sottoposte alla stessa tensione di alimentazione V .

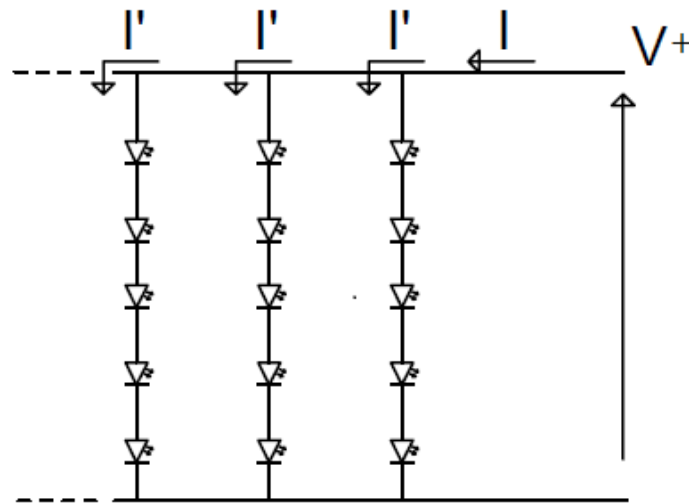


Fig.2.21 - Schema elettronico di collegamento stringhe (array) di 5 LED

Tuttavia, a causa delle variazioni nella tensione di soglia V_y (particolare valore di tensione V_F) di ogni LED in seguito a variazioni di temperatura e difetti di fabbricazione, la tensione totale di ogni stringa differisce da quella delle altre stringhe, inoltre, per assicurare un flusso luminoso omogeneo e uniforme è necessario che ogni stringa di LED sia attraversata dalla stessa corrente.

Per assicurare tali condizioni, il metodo più semplice è quello di connettere una resistenza esterna in serie ad ogni stringa e di alimentare tutte le stringhe con un'unica sorgente di tensione costante.

Questo metodo anche se economico richiede una sorgente di tensione costante molto stabile e causa un consumo di potenza con conseguente dissipazione di calore nelle resistenze aggiunte.

Controllo attivo

Per ottenere una regolazione efficiente ed accurata si ricorre ad un limitatore di corrente integrato, che consiste nel porre un regolatore di tensione TL317C in serie al carico e alla resistenza, come illustrato in Fig. 2.22.

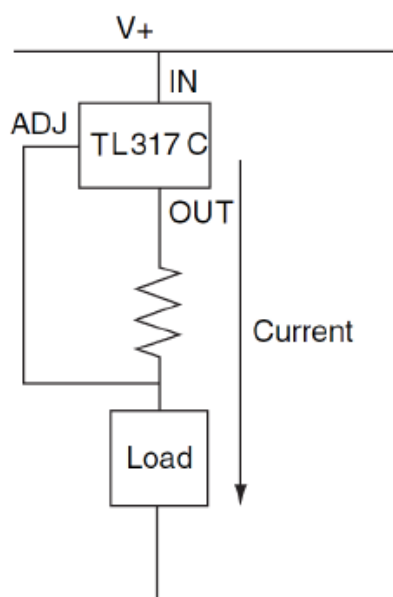


Fig.2.22 - Limitatore di corrente basato su regolatore di tensione integrato TL317C

Tale integrato, oltre a richiedere una tensione di riferimento, possiede un pin di feedback ADJ il quale regola la corrente in seguito ad un confronto tra la tensione di riferimento e quella ai capi della resistenza.

Sarà quindi possibile connettere in parallelo alla stessa sorgente di tensione posta ogni 50m (Alimentatore 230Va.c./24Vd.c) più stringhe LED da 45cm (per l'esattezza saranno 111 in 50m) avendo la garanzia che tutte le stringhe siano percorse dalla stessa corrente stabilizzata, sinonimo di un corretto funzionamento dei LED a livello elettrico e di comportamento ottico (emissione luminosa omogenea e costante).

Il circuito integrato di limitazione di corrente, viene quindi collegato in serie su ogni stringa.

In caso di cortocircuito o rottura di un LED della stringa la corrente e la tensione ai capi dell'integrato TL317C aumentano bruscamente causando una grande dissipazione di potenza e quindi calore, il quale fa scattare un dispositivo di arresto termico integrato nel TL317C. In questo modo la stringa si auto esclude dal circuito; due ulteriori diodi presenti sulla stringa del circuito stampato permettono il sezionamento della stringa garantendo il regolare funzionamento delle altre.

Per i PowerLED, dato l'aumento della potenza in gioco, si richiede una modalità differente di regolazione: un regolatore switching è un circuito che utilizza componenti capaci di immagazzinare energia (induttanze, capacità) per trasferire l'energia dall'ingresso all'uscita a pacchetti temporali. I circuiti di retroazione regolano il trasferimento di energia per mantenere una tensione costante in uscita entro i limiti di carico del circuito.

Con questo tipo di regolatori è possibile ottenere alte efficienze di conversione anche con grandezze di input e output variabili.

2.6 Proprietà fotometriche dei LED

I LED, intesi come sorgenti per l'illuminazione di ambienti, sono definiti e classificati in base alle caratteristiche ottiche, elettriche, energetiche e principalmente fotometriche.

Prima di introdurre gli aspetti fondamentali della fotometria, viene aperta una piccola parentesi per spiegare il motivo per il quale solo una porzione di spettro (lunghezze d'onda) tra 380nm e i 780nm sia visibile ai nostri occhi.

Per questo motivo è necessario affrontare previamente qualche aspetto di fisiologia.

2.6.1 L'occhio umano

La retina dell'occhio umano è una superficie sensibile costituita da fotorecettori, il cui compito è quello di trasformare in impulsi elettrici le informazioni ricevute dalle reazioni fotochimiche che vengono attivate dalla radiazione luminosa. I segnali quindi vengono inviati ai neuroni retinici che sono variamente connessi fra di loro ed effettuano una prima elaborazione del segnale visivo. Gli assoni delle cellule gangliari si riuniscono in modo da formare il nervo ottico, un cavo che conduce l'informazione visiva fuori dalla retina fino ai centri superiori.

Senza entrare nel dettaglio nell'anatomia, fisiologia, neurologia e psicologia del sistema visivo umano, ci si soffermerà solo al livello dei fotorecettori principali: coni e bastoncelli (*Fig. 2.23*) e alla loro sensibilità alle varie lunghezze d'onda.

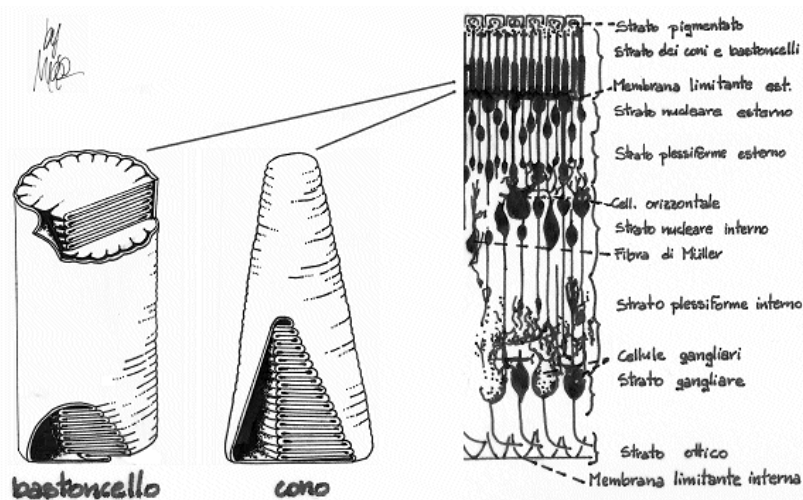


Fig.2.23 - Occhio umano: bastoncelli e coni

I bastoncelli, di forma più allungata rispetto ai coni, sono molto numerosi (più di 100 milioni di cellule per occhio), sono presenti uniformemente in tutta la retina, sono sensibili solo alle differenze di intensità luminosa e sono responsabili della visione quando c'è pochissima luce.

In altre parole sono responsabili della visione "notturna" (scotopica) e non permettono di distinguere i colori. Se si considera il livello d'illuminamento durante la visione delle immagini riprodotte da display o videoproiettori, raramente i bastoncelli vengono attivati e partecipano alla

visione in maniera esclusiva. Nel grafico qui in basso, a sinistra (linea azzurra), è indicata la curva di sensibilità dei bastoncelli, con un picco attorno ai 507 nanometri (vedi Fig. 2.24).

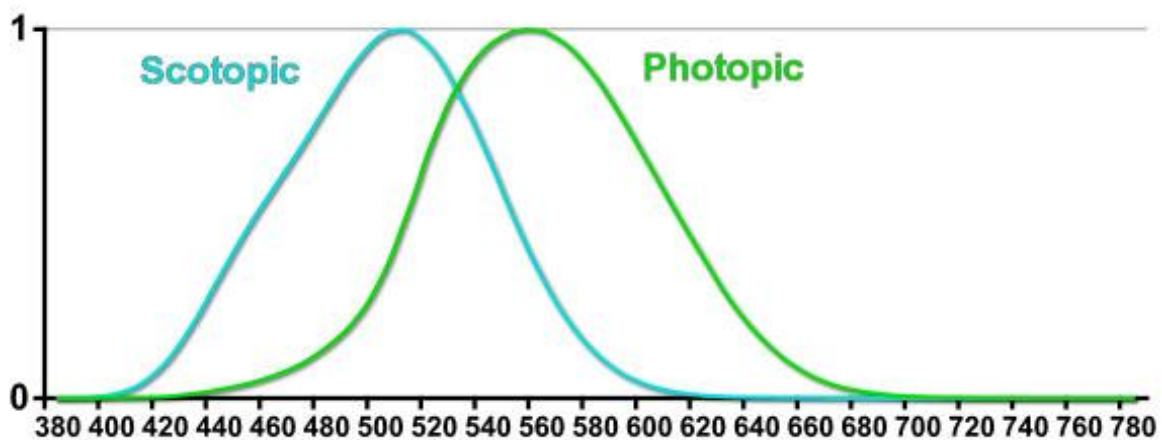


Fig.2.24 - Curve di sensibilità fotopica e scotopica – valori normalizzati

I coni sono costituiti da tre classi ben distinte di cellule sensoriali, sono meno numerosi dei bastoncelli (meno di un ordine di grandezza), la loro presenza è concentrata nella fovea (è la zona centrale della retina in corrispondenza dell'asse ottico), vengono attivati da un flusso luminoso decisamente più sostanzioso rispetto ai bastoncelli e per questo motivo sono responsabili della visione diurna (fotopica).

Come già anticipato, la curva di sensibilità generale dei nostri occhi varia in relazione al livello di illuminamento; in particolare, la curva di sensibilità della visione scotopica (notturna) si riferisce a livelli di illuminamento compresi tra 1 lux e 0,00001 lux.

La visione fotopica (diurna) è attiva per livelli di illuminamento compresi tra 0,01 lux e più di 100.000 lux. Per livelli d'illuminamento compresi tra 0,01 lux e 1 lux, sono attive entrambe le classi di cellule sensoriali e la curva di sensibilità, detta mesopica, è più o meno a metà strada tra quella fotopica e quella scotopica.

2.6.2 Fotometria e grandezze illuminotecniche

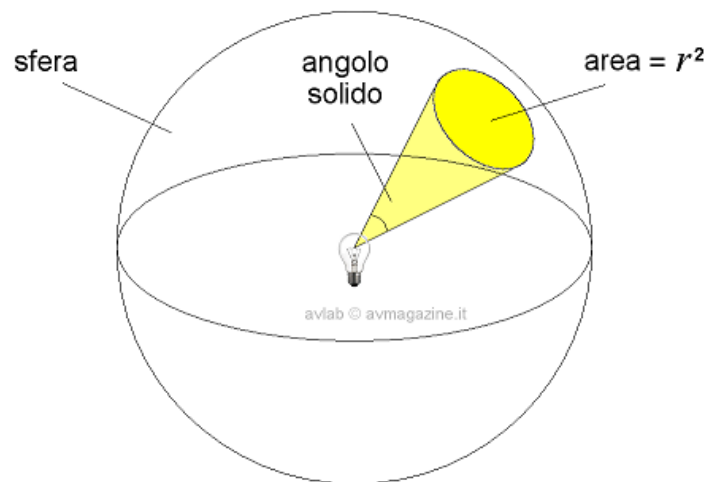
Alla base delle misure fotometriche c'è la radiometria, essa è la misura delle quantità associate all'energia radiante.

L'unità di misura fondamentale in radiometria è il watt (joule al secondo). Tutte le altre unità sono derivate dal watt, declinato per unità di superficie, distanza, angolo solido etc. etc.

2.6.2.1 Radiometria

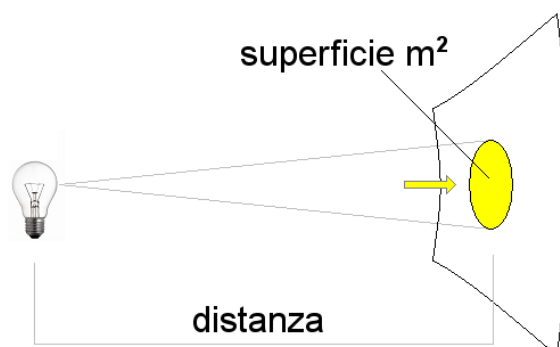
Flusso radiante e intensità radiante

Il flusso radiante è la potenza totale (in tutte le direzioni) prodotta nello spettro elettromagnetico da una sorgente: il flusso viene misurato in watt.



L'intensità radiante è quella porzione di flusso radiante compresa nell'unità di angolo solido. L'unità di misura dell'angolo solido è lo steradiano [sr], quindi l'intensità radiante viene misurata in watt per steradiano.

Irradianza e radianza



L'irradianza è l'unità di misura più utilizzata nella strumentazione radiometrica e si riferisce alla quantità di radiazione che cade sull'unità di area, viene indicata generalmente in watt per m².

Appare quindi ovvio come l'irradianza sia inversamente proporzionale alla distanza ed è infatti legata alla legge dell'inverso del quadrato.

La radianza è l'altra importante misura utilizzata in radiometria ed è la quantità di radiazione riflessa, trasmessa o emessa da una superficie. Viene quantificata in watt per steradiante per m² e, in caso di una superficie ideale piana che diffonda in maniera uniforme in tutte le direzioni, la radianza è pari alla irradianza divisa per π .

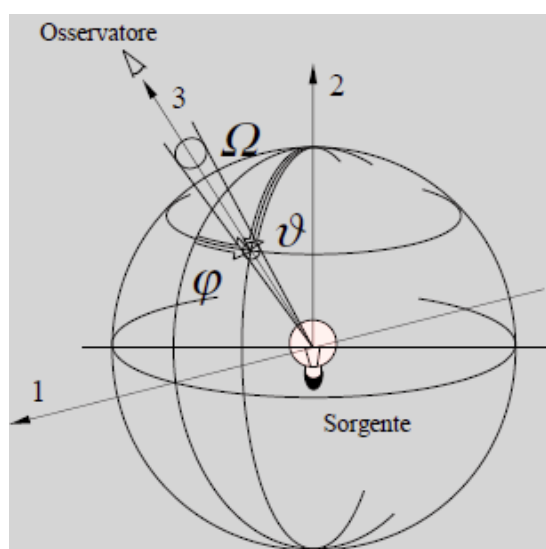
2.6.2.2 Fotometria

La fotometria è una branca della radiometria e si occupa della misura della quantità dell'energia luminosa emessa da una sorgente, emessa da una superficie o ricevuta da una superficie, in relazione alle sensazioni visive che sono proprie dell'occhio umano. La strumentazione è la stessa della radiometria, con due differenze sostanziali: i sensori utilizzati sono filtrati secondo la curva di sensibilità fotopica dell'occhio umano.

Le unità di misura sono quelle proprie della fotometria ad iniziare dalla candela [cd] (lumen per steradiante): 1 cd è l'intensità luminosa di una sorgente monocromatica con picco 555 nm (frequenza 540THz) che emette con potenza ottica di (1/683)W in un angolo solido di 1 steradiante [sr].

Flusso luminoso, intensità luminosa, illuminamento e luminanza

Flusso Luminoso [lm]: "è la quantità totale di radiazione emessa nell'unità di tempo da una sorgente primaria o secondaria pesata con la sensibilità spettrale dell'occhio umano".



$$\Phi_v = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} I_v(\vartheta, \varphi) d\vartheta d\varphi \quad [lm]$$

$$\Phi_e = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} I_e(\vartheta, \varphi) d\vartheta d\varphi \quad [W]$$

Il flusso luminoso radiante è la potenza luminosa irradiata dalla sorgente luminosa in considerazione.

Si misura con una sfera integratrice o con un goniometro.

Dal flusso luminoso e dalla potenza elettrica assorbita dalla fonte luminosa si definisce un parametro molto importante per valutare l'efficienza di un dispositivo: l'efficienza luminosa è data dal rapporto fra flusso luminoso emesso e potenza elettrica assorbita [lm/W].

Intensità luminosa [cd]: “concentrazione di luce in una direzione specifica irradiata per unità di tempo”.

È l'omologo dell'intensità radiante pesata secondo la curva di sensibilità fotopica, corrisponde quindi alla porzione di flusso luminoso compresa nell'unità di angolo solido.

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad [cd]$$

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad \left[\frac{W}{sr}\right]$$

La potenza luminosa (radiante) per unità di angolo solido in una data direzione dalla sorgente.

La strumentazione di misura è composta da luxmetri o luminanzometri.

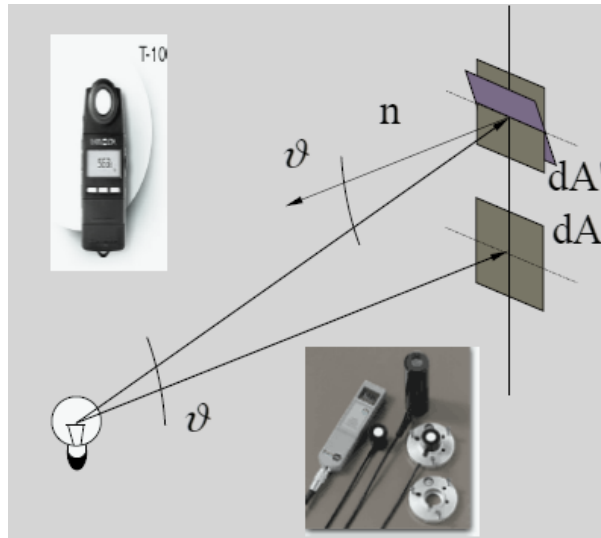
La distribuzione dell'intensità luminosa risulta particolarmente critica per le applicazioni dove è necessario un controllo preciso o una caratterizzazione dell'emissione della sorgente. Le tipiche specifiche dei LED includono informazioni sull'intensità in funzione di uno degli assi di riferimento e dell'angolo di emissione (Beam Angle), definito come l'angolo per cui il valore del profilo di intensità polare è metà del valore nella direzione dell'asse di riferimento (tipicamente varia da 9 a 120°).

Illuminamento [lux]: “rapporto tra il flusso luminoso ricevuto da un elemento di superficie e l'area di questo elemento”

L'illuminamento caratterizza l'illuminazione degli ambienti ed è definito anche come “una superficie pari a 1m² che riceve un flusso di 1lm ha un illuminamento di 1lux”.

Il lux si può esprimere quindi anche in [lm/m²].

Come detto precedentemente, si definisce irradianza “il flusso luminoso radiante ricevuto per unità di area”.

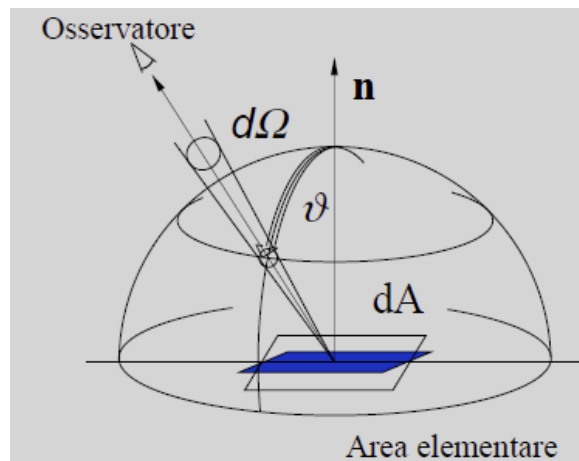


$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad [lx]$$

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

La misura avviene con l'utilizzo di luxmetri.

Luminanza [cd/m^2]: “rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente luminosa in una data direzione e l'area apparente di quella superficie”.



$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\vartheta} \quad [cd/m^2]$$

$$L_e = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\vartheta} \quad \left[\frac{W}{sr * m^2}\right]$$

La radianza è definita come il flusso luminoso (radiante) per l'angolo solido per l'area, proiettata ortogonale alla direzione di osservazione.

Lo strumento di misura per misurare la luminanza è un luminanzometro.

La luminanza di un LED può essere anche definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa in una certa direzione (misurata in cd) divisa per l'area del chip proiettata in quella direzione; si misura in cd/m^2 e dà un'idea di quanto efficientemente l'area del chip è utilizzata per ottenere una certa intensità luminosa avendo fissato la corrente di iniezione.

Il suo tipico spettro di emissione è raffigurato in figura, posto in comparazione con la curva spettrale di sensibilità dell'occhio umano.

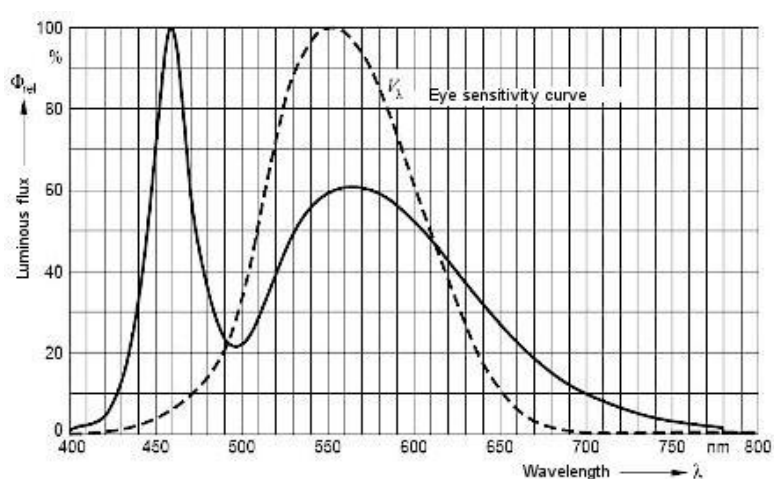


Fig.2.25 - Tipico spettro di emissione di un LED (curva continua) e curva spettrale di sensibilità dell'occhio umano (curva tratteggiata).

2.6.3 Colorimetria

La colorimetria è la disciplina che si occupa di standardizzare la misurazione del colore attraverso lo studio dei modelli di colore.

Considerando l'insieme delle tre classi di coni, l'occhio umano è sensibile a frequenze dello spettro luminoso secondo una curva approssimativamente a campana con un picco intorno a 555 nm (coni regione del verde).

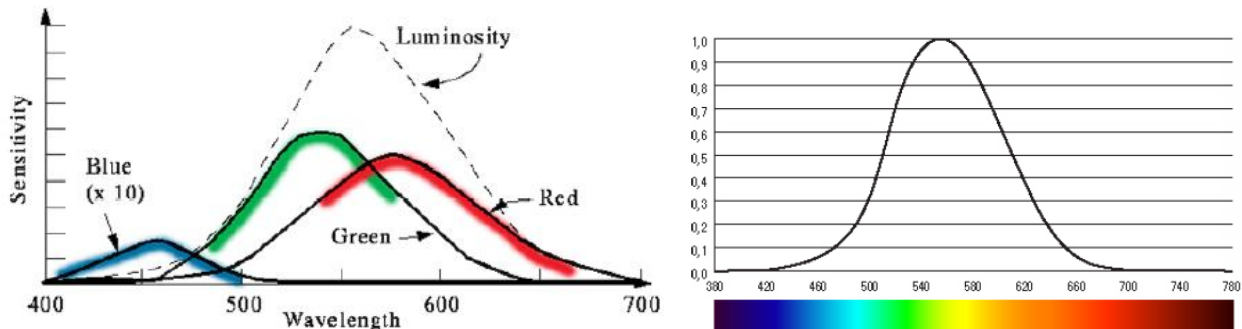


Fig.2.26 - Curve spettrali sensibilità occhio umano – curva a campana

La Fig.2.26, infatti, mostra l'andamento della curva di sensibilità (emanata dal CIE – Commission Internationale de l'Eclairage) dell'occhio umano in funzione della lunghezza d'onda λ .

L'andamento a “campana”, non costante, della curva di sensibilità porta quindi a percepire maggiormente i colori nella zona centrale (come il verde/giallo) rispetto a colori al limite della lunghezza d'onda (come il viola o il rosso) a parità di potenza ottica.

Dato che la sensibilità dell'occhio umano è quindi un parametro estremamente soggettivo, soprattutto per quanto riguarda la percezione del colore, la CIE ha emanato uno standard che stabilisce delle curve di sensibilità al rosso $x(\lambda)$, al verde $y(\lambda)$ e al blu $z(\lambda)$, dove la curva relativa al verde coincide con la curva della sensibilità totale.

I colori saranno quindi rappresentati in uno spazio tridimensionale in cui le coordinate di un colore sono legate alla quantità di colori necessari per riprodurlo.

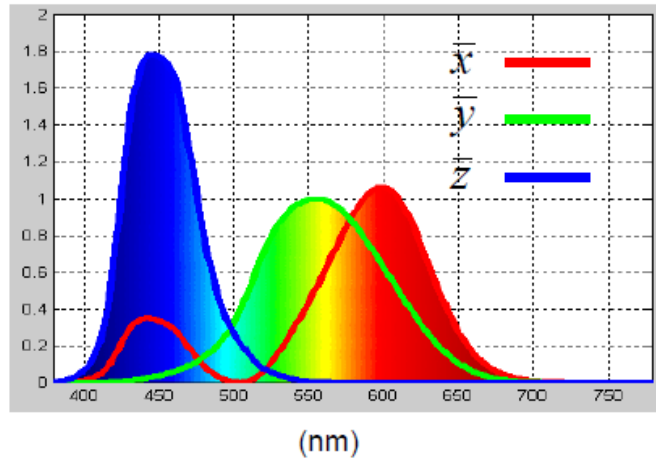


Fig.2.27 - Curve di sensibilità, rosso $\bar{x}(\lambda)$, verde $\bar{y}(\lambda)$ e blu $\bar{z}(\lambda)$

Da queste curve si possono ottenere i livelli di stimolo (o coordinate tricromatiche) ai tre colori nota la potenza ottica $P(\lambda)$:

$$X = \int \bar{x}(\lambda)P(\lambda)d\lambda ; \quad Y = \int \bar{y}(\lambda)P(\lambda)d\lambda ; \quad Z = \int \bar{z}(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

Dove Y è la luminanza.

Normalizzando rispetto alla somma $X+Y+Z$, le coordinate tricromatiche CIE X,Y,Z si trasformano nelle coordinate Lxy identificabili nel diagramma cromatico dove x e y sono indipendenti dalla luminanza L:

$$x = \frac{X}{(X+Y+Z)} ; \quad y = \frac{Y}{(X+Y+Z)} ; \quad L = Y$$

Tramite queste coordinate tutti i colori sono quindi individuabili nel diagramma Lxy di Fig.2.28.

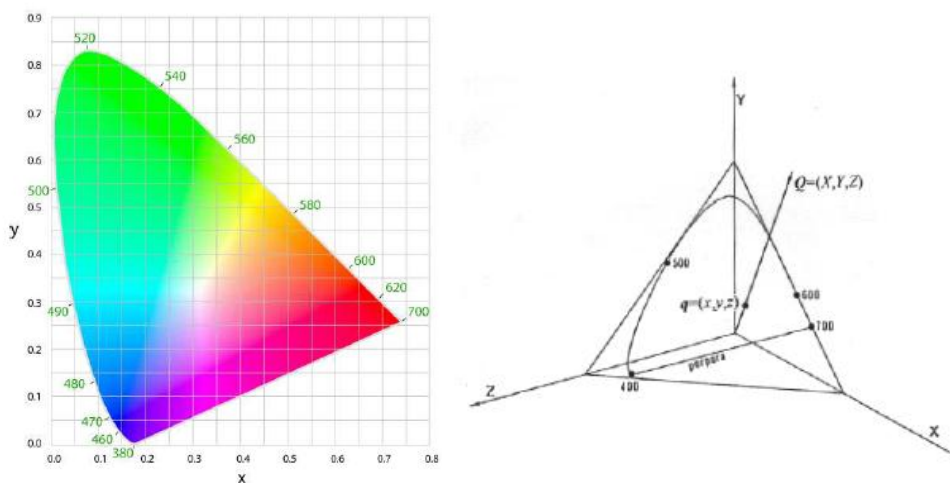


Fig.2.28 - Diagramma Lxy

La combinazione o il mix di più sorgenti luminose è usata in molte applicazioni, ad esempio, per produrre luce bianca.

Come si può notare, nella parte centrale del diagramma di cromaticità c'è il bianco, che può assumere vari livelli a seconda delle intensità delle sorgenti luminose combinate.

Il bianco è più puro in modo proporzionale a quanti più colori partecipano alla sua formazione dando uno spettro piatto su tutta la banda del visibile.

Per individuare tutti i possibili livelli di bianco si utilizza il concetto di temperatura di colore: “temperatura di un radiatore plankiano la cui radiazione ha la stessa cromaticità dello stimolo dato. Sorgente analizzata e corpo nero hanno la stessa apparenza per un osservatore umano, ma possono avere distribuzione spettrale differente”.

Per corpo nero si intende un “radiatore che assorbe completamente la radiazione incidente, lo spettro della radiazione emessa dipende dalla sua sola temperatura; all'aumentare di questa aumenterà l'energia radiante”.

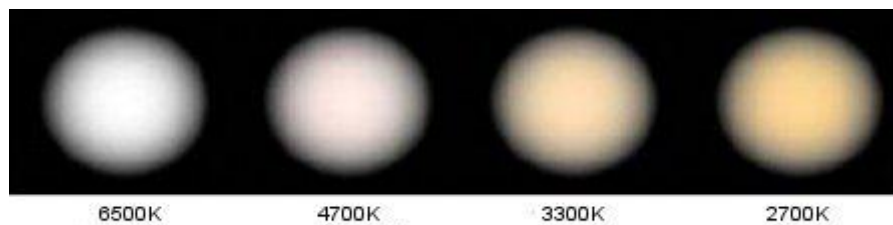


Fig.2.29 - Bianco: temperature di colore sorgenti luminose

Prendendo come paragone la luce del sole, più alta è la temperatura di colore di una sorgente, tanto più prossima sarà al colore bianco; ad esempio una lampadina a filamento ha una temperatura di colore di 2856 K, una sorgente alogena 2800-3200K, il sole a mezzogiorno 5000 K (*Fig.2.29*).

Per poter caratterizzare la qualità di una sorgente si è definito dalla CIE il CRI (Color Rendering Index), figura di merito assegnata alle varie fonti luminose e normalizzata a 100 sulla luce del giorno: “è una misura del grado di conformità della percezione degli oggetti illuminati dalla sorgente in prova a quella degli stessi oggetti illuminati dalla sorgente di riferimento”. In parole povere valuta la capacità della sorgente di rendere i veri colori di un oggetto.

Un corpo illuminato da una sorgente di tipo ad incandescenza ha CRI pari a 100, tale valore viene preso come riferimento.

I valori CRI ottenuti per confronto di lampade del tipo fluorescente compatto presentano un indice CRI circa pari a 80.

Come si vedrà in seguito, i LED presentano un indice di resa cromatica CRI pari a circa 70 ÷ 80.

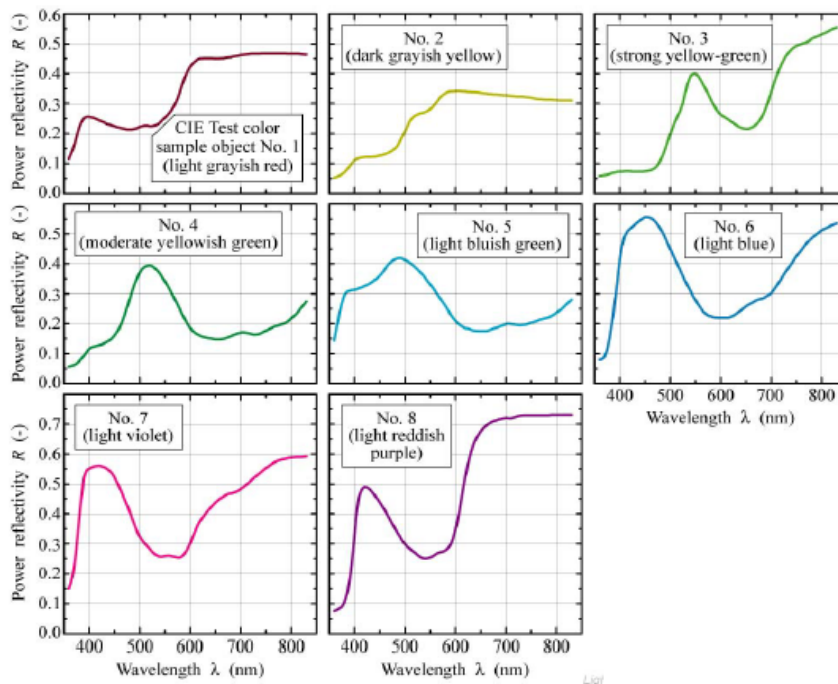
Un indice CRI al di sotto di 60 produrrebbe una sensazione visiva innaturale.

Per determinare l'indice di resa cromatica:

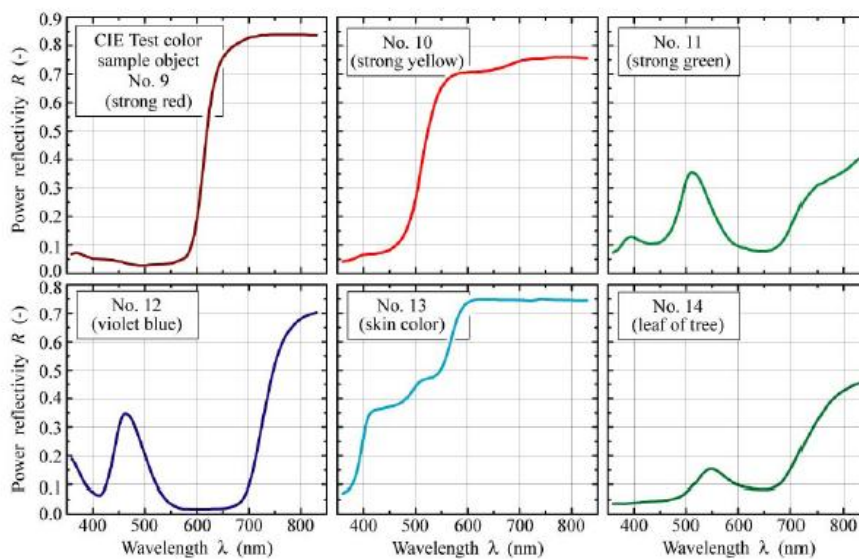
- si eseguirà la misura sulla sorgente;
- verrà misurato il colore visto;
- confrontato con quello calcolato riflesso da 14 campioni teorici.

I 14 campioni teorici indicati sono composti da:

- 8 campioni teorici generali; colorazione poco intensa R[1 ÷ 8],



- 6 campioni speciali; colorazione più saturi R[9 ÷ 14].



Il calcolo degli indici di resa CRI (indicato come R_a') del colore generale si definisce valutando la resa dei 14 campioni di colore (generalmente più speciali) come:

$$R_a' = 100 - 4,6(\Delta E)_i$$

Dove ΔE_i è la differenza del colore (distanza nello spazio) di uno stesso campione (i-esimo) sotto le due sorgenti.

L'indice del colore R_a si calcola come media aritmetica degli 8 indici generali R_i ($i= 1 \div 8$), valuta quindi solo i primi 8 di questi campioni, trascurando i colori saturi:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

È, infine possibile una classificazione in base all'indice R_a :

| Grado di riferimento | Indice di Ra |
|-----------------------------|---------------------|
| 1 A | $R_a > 90$ |
| 1 B | $80 < R_a < 90$ |
| 2 | $60 < R_a < 80$ |
| 3 | $40 < R_a < 60$ |
| 4 | $R_a < 40$ |

Fig.2.30 - Classificazione indice Ra

2.7 Fattori che influenzano la qualità dei LED

Tre fattori principali influenzano la qualità dei LED:

1. *l'iniziale variabilità delle caratteristiche ottiche ed elettriche;*
2. *la dipendenza di tali caratteristiche dalla temperatura e dalla corrente elettrica;*
3. *la degradazione spettrale.*

1. Iniziale variabilità delle proprietà ottiche ed elettriche

Le proprietà ottiche ed elettriche iniziali di una partita di LED, come la corrente in ingresso, l'intensità, il colore e il profilo della luce emessa, variano a causa delle imperfezioni nei materiali e delle variazioni nel processo di produzione (Fig.2.31). In generale, la variabilità della distribuzione dell'intensità luminosa e del colore dell'emissione dipende dalle tolleranze nel posizionamento del chip e nella conformazione dell'involucro: tali variazioni possono essere fondamentali quando si producono sorgenti omogenee in colore e intensità. Le variazioni di intensità sono veloci durante la fase iniziale e poi si stabilizzano all'interno di un tracciato di degradazione più regolare. Poiché è impossibile alterare a posteriori (cioè dopo la produzione) le caratteristiche dei LED, essi sono suddivisi dai produttori secondo il loro voltaggio in ingresso, intensità e colore.

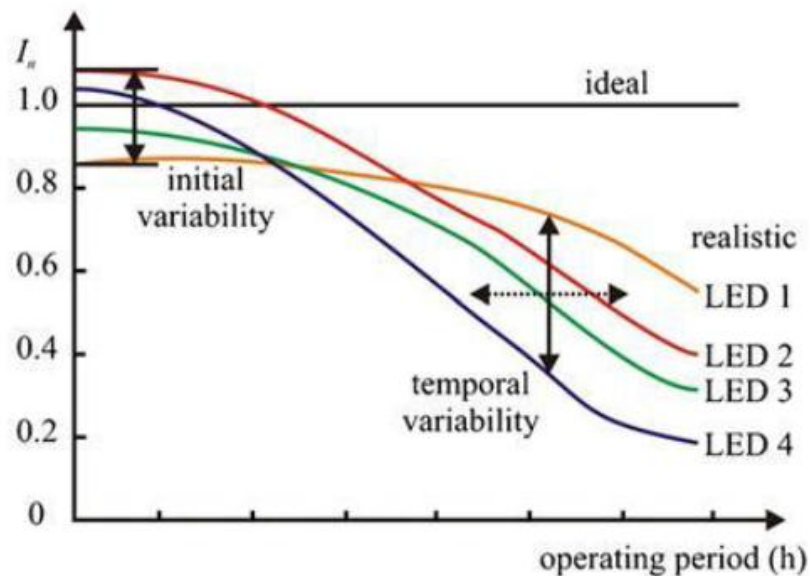


Fig.2.31 - Variabilità di intensità iniziale, degradazione nel tempo dell'intensità, variabilità temporale del processo di degradazione di quattro ipotetici LED della stessa partita.

La variazione dei parametri all'interno della medesima classe può essere relativamente ampia:

- l'intensità luminosa può variare fino al 30%;
- il voltaggio in ingresso può variare tipicamente di 0,2V;
- le coordinate cromatiche (x, y) sono solitamente definite da una regione approssimativamente quadrangolare di dimensione variabile da 0,005 a 0,03 unità, e

variano anche al di fuori di questa regione. Tali regioni prendono il nome di binnings.

Le proprietà elettriche e meccaniche dei LED e la loro modalità di degradazione sono influenzati da una gran quantità di fattori, tra cui: il materiale del chip, la resistenza termica dell'involucro, la stabilità meccanica, design del prodotto, il carico di corrente e fattori ambientali (temperatura ambientale, umidità, scariche elettrostatiche).

2. Dipendenza dell'intensità dalla temperatura e dalla corrente

La temperatura di giunzione può influire in maniera significativa su molti dei parametri di un diodo, come il voltaggio di mandata, la lunghezza d'onda di picco (e quindi il colore), la larghezza della banda di emissione e la dinamica del processo di degradazione. La dipendenza dell'intensità dalla temperatura è una caratteristica importante per un LED: conoscerla può essere molto utile sia per pianificare test accelerati di durata di vita, sviluppando modelli di previsione basati sui risultati ottenuti, sia per progettare le proprietà termiche del prodotto.

Esistono diverse tecniche disponibili per misurare la temperatura di giunzione, ma la più pratica ed utilizzata è basata sulla misurazione del voltaggio in ingresso: il procedimento consiste nell'inserire i diodi all'interno di un forno a temperatura controllata dove la temperatura di giunzione, che si può approssimare con la temperatura del forno, viene fatta variare gradualmente (da 20 a 120°C) mentre si misura il voltaggio in ingresso. I dati così ottenuti sono poi utilizzati per stimare la temperatura in condizioni reali: l'accuratezza del metodo è stimata essere attorno a 2°C di errore.

3. Degradazione spettrale

La degradazione spettrale, cioè la degradazione della brillantezza e del colore, è uno dei temi più studiati, ed è legata a molteplici cause. Dal punto di vista fisico, l'aumento di centri di ricombinazione non radiativa nella regione attiva, dovuto a sua volta all'aumento della temperatura di giunzione associata ad un'alta corrente di iniezione, causa la degradazione dell'intensità. Un secondo processo a cui è legata la degradazione è la diminuzione dell'efficienza dei fosfori, principalmente utilizzati nei LED bianchi, sempre in seguito all'eccessiva temperatura nella giunzione. Un terzo motivo è la degradazione degli incapsulanti epossidici (il package), che non devono superare la temperatura operativa massima di circa 120°C. Le classiche capsule da 5mm, che sono state utilizzate per decenni, hanno una resistenza termica di circa 250K/W e si riscaldano rapidamente se il LED viene alimentato con corrente elevata, mentre gli involucri più recenti utilizzano un collegamento metallico che lega direttamente il chip al dissipatore di calore attraversando l'involucro, facendo diminuire la resistenza termica fino a 5K/W.

2.8 Vita dei LED

Per “vita utile” si intende generalmente il lasso di tempo che intercorre dalla prima accensione della sorgente fino al momento in cui una certa percentuale di lampade smette bruscamente di funzionare. Per sorgenti di luce tradizionale si fa riferimento al diagramma di Weibull che ne definisce una curva di sopravvivenza.

Le sorgenti luminose LED invece non tendono a spegnersi improvvisamente, esaurita la loro vita utile; i diodi LED nel tempo diminuiscono gradualmente il loro flusso luminoso iniziale fino ad esaurirsi completamente in un periodo molto lungo eccetto rotture improvvise per guasto o malfunzionamento. Per questo motivo è necessario prevedere termini di confronto diversi da quelli utilizzati per le comuni sorgenti di illuminazione.

La misura del decadimento del flusso è un concetto relativamente semplice in se per sé: si lasciano accesi i LED per un lungo periodo di tempo e si misura il cambiamento nel loro output luminoso. Poiché non è fattibile misurare questi dispositivi per un decennio è necessaria qualche forma di previsione o estrapolazione: metodi teorici e sperimentali per la previsione della degradazione dell'intensità sono basati quindi su metodologie di previsione, che prendono in considerazione la corrente e/o la temperatura di giunzione. Lo scopo è quello di ottenere nel minor tempo possibile previsioni affidabili della durata di vita dei LED in condizioni normali di funzionamento.

Il parametro più utilizzato nella definizione di vita utile è stato definito da un gruppo industriale, la quale ha determinato che il mantenimento dal 70% del flusso luminoso iniziale corrispondente al limite inferiore al di sotto del quale l'occhio umano percepisce una riduzione della luce emessa. Diversamente si può supporre che una riduzione del flusso luminoso iniziale del 30% sia accettabile per la maggioranza delle applicazioni.

Per questo motivo viene definita come vita utile di un LED il tempo trascorso dalla prima accensione fino al raggiungimento di questo limite indicato come L70 (Lumen Maintenance 70%).

L'azienda con la quale è stato eseguito questo studio, ha realizzato nel corso del primo anno di attività (anno 2000) un impianto illuminante a sorgenti LED. Questo impianto risulta essere quello di una galleria adibita al trasporto su gomma situata in un paese estero confinante. L'illuminazione, da quando è stata messa in esercizio fino ad oggi, è sempre stata in funzione (24 ore su 24). Di recente i tecnici dell'azienda hanno avuto modo di ritornare sul sito dell'installazione ed effettuare un controllo visivo dalle sorgenti LED (principalmente delle stringhe LED) le quali nel corso degli anni non hanno mai subito danni o necessitato di sostituzioni.

L'azienda, quindi, garantisce una vita media delle stringhe LED superiore alle 100.000 ore dalla prima accensione.

Se anche si ammettesse, nel corso di questi 12 anni, un calo del flusso luminoso questo si potrebbe reputare (come da L70) ininfluenza per i limiti fisiologici dell'occhio umano, quindi inferiore al 30%. La vita utile considerata è stata di 100.000 ore.

Capitolo 3

Sistema illuminante

Come è stato accennato, il LED per uso illuminotecnico necessita di più unità poste in serie e/o parallelo, poiché preso singolarmente non sarebbe ovviamente sufficiente ad adempiere compiti illuminanti.

Queste unità contenenti più LED sono state denominate stringhe: esse sono formate da circuiti stampati di circa 45cm di lunghezza, costituiti da:

- un regolatore di corrente all'ingresso (vedi §2.5);
- resistenze di valore opportuno;
- un determinato numero di LED collegati in serie (fisica ed elettrica) fra loro.

Le stringhe, verranno collegate una dopo l'altra attraverso connessioni elettriche per creare l'apparecchio illuminante; la successione di queste, appositamente collocate, creerà l'intero sistema illuminante.

Le stringhe dell'intero sistema illuminante risulteranno ognuna elettricamente in parallelo all'altra per questioni di facile comprensione.

Il prototipo di apparecchio illuminante a sorgenti LED sul quale è stato incentrato lo studio ed effettuato prove e misurazioni è composto da un metro di corrimano illuminante, alimentato a tensione costante di 24Vd.c. e contenente due stringhe LED in parallelo.

3.1 Descrizione

Il sistema illuminante in questione è costituito da una successione di apparecchi illuminanti a sorgenti LED. L'apparecchio è costituito da un tubo in acciaio inossidabile di modulo 2050mm (~2m) di lunghezza, 42.4mm di diametro circolare appositamente sagomato per l'alloggiamento delle stringhe LED al suo interno.

La lunghezza è stata decisa arbitrariamente fra le lunghezze standard proposte dall'azienda costruttrice: tuttavia, non è di particolare rilevanza poiché potrebbe essere stata scelta anche di 1m o di 4 per esempio.

La lunghezza di 1m avrebbe avuto lo svantaggio di dover effettuare ogni metro un fissaggio a parete; la lunghezza di 4m avrebbe costituito un modulo troppo lungo e facilmente sollecitato meccanicamente.

Per questo motivo è stato considerato accettabile il compromesso di un apparecchio fissato in galleria ogni 2 metri.

Tuttavia, per lo studio in esame, si farà riferimento all'apparecchio di lunghezza 1m, questo semplicemente per facilitare le misurazioni con apparecchiature fotometriche.

La successione di questi apparecchi illuminanti, intervallati solamente da moduli di fissaggio a parete, costituirà, quindi, il sistema-corrimano illuminante (*Fig.3.1*) definito anche più semplicemente come "sistema illuminante".

Questo sistema, in caso di emergenza, sarà atto allo scopo di elemento strutturale della galleria idoneo alla guida dei soggetti esodanti verso un'area di sicurezza e contemporaneamente da elemento illuminante.

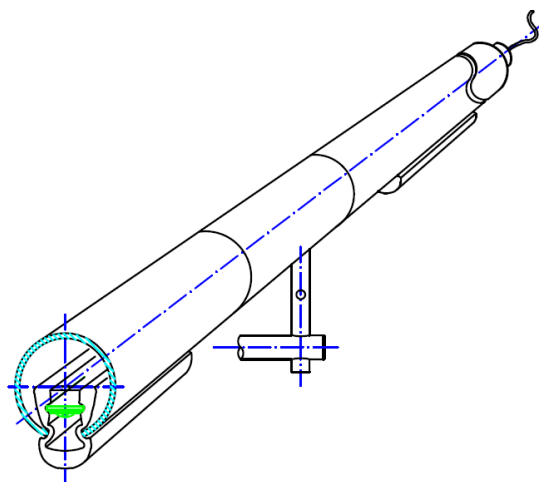


Fig.3.1 - Prospetto sistema-corrimano illuminante: sequenza di apparecchio illuminante- modulo di fissaggio- apparecchio illuminante

Ogni apparecchio illuminante è munito di un'ottica in plexi (PMMA) specificatamente realizzata e opportunamente sagomata, cava e a sezione diffondente semicircolare (*Fig.3.2*).

Generalmente un'ottica ha il compito di indirizzare il flusso luminoso per ottenere la distribuzione desiderata dell'energia luminosa nello spazio. Nel caso in esame si desidera avere un'ottica che permetta di mantenere quanto più aperto e omogeneo il fascio di flusso luminoso (già di per sé tipicamente allargato dei LED). Oltre ad uno scopo ottico, il plexi, ha una fine strutturale; le stringhe LED sono posate al suo interno, rimanendo protette e riparate da qualsiasi agente esterno.

Il plexi, risulta quindi necessario e di fondamentale importanza per il buon funzionamento dell'apparecchio illuminante, permettendo anche in caso di sporco un livello minimo di illuminamento garantito.

Lo svantaggio dell'uso dell'ottica in PMMA è insito nelle sue caratteristiche fisiche e nella lavorazione della sua sezione: durante la fase di fusione del pezzo e di taglio nasceranno delle microscopiche irregolarità le quali, come si vedrà meglio in seguito nei risultati delle misure (§7.2), non permetteranno una perfetta emissione omogenea e simmetrica del prototipo di apparecchio illuminante testato.

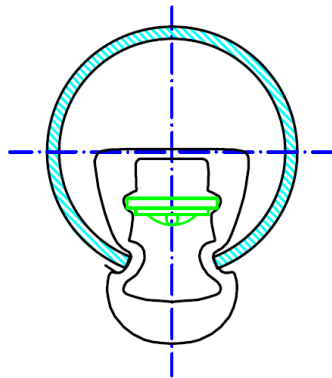


Fig.3.2 - Sezione corrimano illuminante: PMMA e collocazione stringhe al suo interno

Fissaggio

Le estremità dei moduli d'apparecchio sono variabili per l'aggiustamento della lunghezza e vengono collocate tramite elementi di fissaggio regolabili tridimensionalmente (da 50 ÷ 220mm di lunghezza) alle pareti della galleria (*Fig.3.3*).



Fig.3.3 - Dettaglio corrimano illuminante: fissaggio a parete

Il sistema-corrivano illuminante gode di una certa flessibilità di installazione, potendo essere installato ad un'altezza, una distanza dalla parete e un'inclinazione a preferenza dell'utente.

Secondo, lo studio della conformazione di galleria di nuova generazione (vedi §4), si reputa ottimale un'installazione:

- ad un'altezza consona, per fornire, ai soggetti esodanti un solido appoggio e guida strutturale; come da norma l'altezza dovrà aggirarsi intorno ad un metro dal piano di calpestio.

Un compromesso fra l'altezza del corrimano, utile all'evacuazione, e l'altezza adeguata per un buon illuminamento, è stato quello di scegliere un'installazione a 1,15m di altezza dal piano di calpestio (le focali dell'apparecchio si troveranno qualche centimetro più in basso).

- Anche la distanza di installazione dalla parete della gallerie risulta essere una scelta da valutare; permettendo un certo gioco di fissaggio è possibile impostare una distanza ottimale dalla parete.

In base alle misure del sito in oggetto, si è scelta una distanza di 20cm dalla parete curva della galleria.

- La rotazione del corrimano, o meglio l'angolazione delle sorgenti rispetto la verticale, è del tutto irrilevante ai fini strutturale. Tuttavia risulta di particolare importanza ai fini della direzionalità del flusso di emissione: variando l'inclinazione su una verticale si modifica quindi la direzione dell'angolo di emissione delle sorgenti LED, in generale da 20° ad un massimo di 50°.

In conformità alle caratteristiche dimensionali della galleria e al percorso di esodo da illuminare si è scelta come ottimale un'inclinazione di 50° dall'asse verticale.

Si dispone, quindi, in generale di una buona adattabilità per ottimizzare il sistema illuminante.

Il montaggio risulta facile e veloce, permettendo quindi una manutenzione semplice, riducendo i tempi di intervento delle squadre in caso di sostituzione dei moduli di apparecchio illuminante per malfunzionamento/danneggiamento.

Per la topologia del circuito stampato e per il funzionamento dei componenti elettronici costituenti la stringa LED, nel caso di danneggiamento ad un singolo LED (o ad una intera stringa di LED) il massimo disservizio derivabile sarà lo spegnimento della stringa cui esso appartiene; ossia i 45cm di stringa di circuito stampato e l'esclusione di questa dal circuito elettrico.

All'interno del modulo di apparecchio illuminante da 2050mm, si collocano quattro stringhe LED connesse in successione (in parallelo elettrico) tramite spinotti a contatto strisciante ad incastro e con connettore di sicurezza affinché anche in caso di scosse o vibrazioni non venga "rotto" il contatto elettrico fra esse.

Si ricorda che il LED ha una struttura molto più resistente a vibrazioni ed urti rispetto ad una normale lampadina fluorescente compatta.

Al termine di ogni modulo di apparecchio illuminante (2050mm) il tubo di struttura viene connesso al blocco per il fissaggio a parete.

Questo blocco cavo è puramente strutturale, presenta solamente degli imbocchi per collegare fissamente fra loro i moduli. In questo tratto, l'alimentazione da un modulo di apparecchio illuminante al successivo passa attraverso il blocco di fissaggio tramite un cavo a connettore avvitato che collega l'ultima stringa del modulo di apparecchio illuminante a monte alla prima stringa del modulo di apparecchio illuminante a valle (Fig.3.4).



Fig.3.4 - Dettaglio corrimano illuminante: connessione modulo apparecchio illuminante – blocco di fissaggio a parete; collegamento stringhe di moduli attigui attraverso blocco di fissaggio a parete.

Il collegamento si ripeterà uguale per ogni stringa e per ogni modulo intervallato soltanto ogni 50m dall'alimentazione.

Per l'appunto l'alimentazione avviene tramite alimentatori elettronici posti in quadri inox applicati a parete.

L'alimentatore trasforma la 230Va.c. in due uscite 24Vd.c. Ogni ramo ha una potenza massima in uscita di 120W. Tale potenza è così definita perché si utilizza un gruppo alimentazione formato da un doppio ramo ognuno con una alimentatore di potenza 120W che, nel caso di anomalia di uno, prende in carico anche l'alimentazione dell'altro.

La potenza assorbita da ogni alimentatore (come mostreremo meglio nel §9) sarà 1W/m, ossia 50W per alimentare 50m di sistema illuminante.


Vedi *Allegato D*: schematico distribuzione sistema illuminante (A).


Isolamento e protezione


Classe di isolamento elettrico dell'apparecchio illuminante, quindi anche dell'intero sistema illuminante, è III -IEC (*International Electrotechnical Commission*): la protezione contro la folgorazione si affida al fatto che non sono presenti tensioni superiori alla bassissima tensione di sicurezza SELV (Safety Extra-Low Voltage), ossia la tensione è bassa al punto da non essere normalmente pericolosa in caso di contatto con il corpo umano. Gli apparecchi di Classe III non devono essere provvisti di messa a terra di protezione.


CLASSE D'ISOLAMENTO

CLASSE D'ISOLAMENTO – classificazione dell'apparecchio in rapporto alla possibilità di contatto accidentale diretto con le parti normalmente in tensione o tra queste e la carcassa esterna.

 **CLASSE 0** = apparecchi provvisti del solo isolamento funzionale delle parti attive di alimentazione della lampada.

 **CLASSE 1** = apparecchi con isolamento funzionale e morsetto di terra.

 **CLASSE 2** = apparecchi privi di morsetto di terra, ma dotati di isolamento supplementare per le parti in tensione.

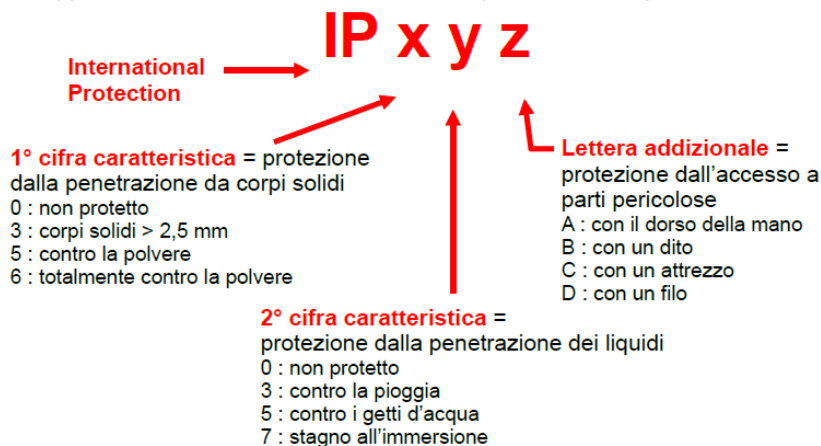
 **CLASSE 3** = apparecchi alimentati a bassissima tensione (< 50V in alternata e 120V in continua) che non costituisce pericolo.



Il grado di protezione degli involucri degli apparecchi illuminanti, è IP67: totalmente protetto contro le polveri e contro l'accesso con un filo e stagno all'immersione.

GRADO DI PROTEZIONE

GRADO DI PROTEZIONE (IP) – codice per identificare la protezione dell'apparecchio dai contatti accidentali e dalla penetrazione di polveri od umidità.



Certificazioni

Il prodotto illuminante possiede le seguenti certificazioni:

- Prova di resistenza al fuoco E30 secondo DIN 402-12: l'apparecchio è stato testato per un tempo di 30 minuti sottoposto a fiamma diretta. La prova ha avuto esito positivo: viene certificatamente assicurato il funzionamento elettrico.
- Prova di sovra e sottopressione: consiste in una prova di tenuta ad un urto di sovrappressione e sottopressione a seguito dell'effetto "stantuffo" del convoglio in galleria ad una velocità di 300 km/h.
- Prova di resistenza meccanica IK09
- Certificazioni di idoneità dei materiali elettici, elettronici e vita utile LED garantita 100.000.

3.2 Stringhe LED utilizzate e specifiche tecniche

Per individuare la tipologia di sorgente ottimale per l'applicazione in galleria, sono state misurate in laboratorio fotometrico quattro tipi di sorgenti luminose, ossia quattro differenti tipologie di stringhe LED, con caratteristiche diverse di:

- circuito stampato;
- interdistanza fra LED;
- LED (differenti potenze, efficienza luminosa, fascio di apertura)

Le indichiamo seguentemente (*Fig.3.5*):

- Stringa con circuito integrato standard, composta da 5 LED (SMD) LW E67C – OSRAM distanziati $2.5 \div 10 \div 10 \div 10 \div 2.5$ cm;
- Stringa con circuito integrato standard, composta da 19 LED (SMD) LW E67C – OSRAM distanziati circa 1cm dalle estremità e circa a 2,4 cm fra loro;
- Stringa con circuito integrato standard, composta da 5 LED (SMD) KWT801-S – SEOUL distanziati $2.5 \div 10 \div 10 \div 10 \div 2.5$ cm;
- Stringa con circuito integrato MCPCB, composta da 5 PowerLED X42180 - SEOUL distanziati $2.5 \div 10 \div 10 \div 10 \div 2.5$ cm.

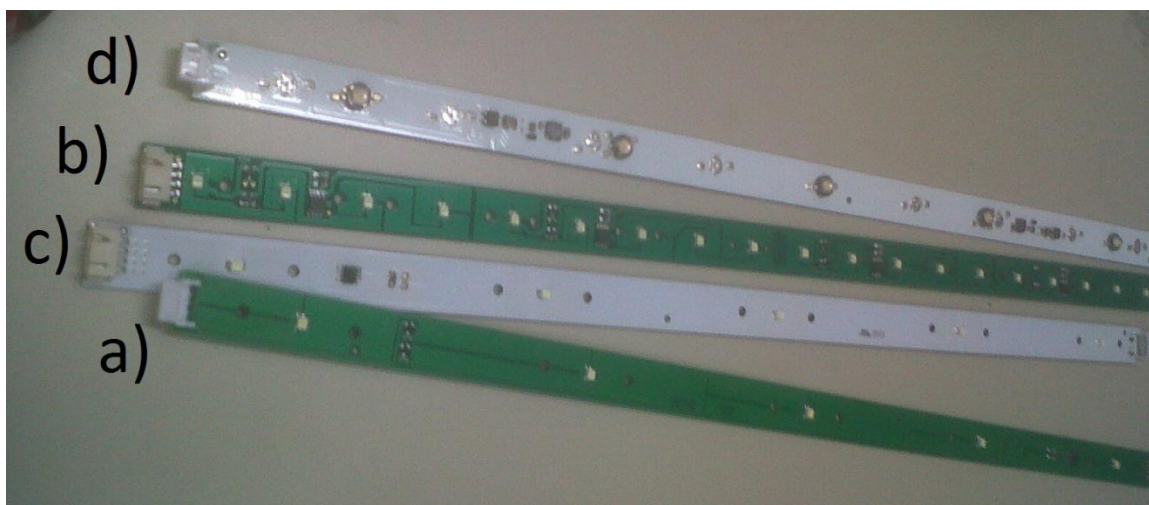


Fig.3.5 - Tipologie stringhe LED misurate in laboratorio:

- 5 LED LW E67C – OSRAM;*
- 19 LED LW E67C – OSRAM;*
- 5 LED KWT801-S – SEOUL;*
- 5 PowerLED X42180 – SEOUL.*

Complessivamente i LED utilizzati sono quindi di tre tipi differenti, appartenenti alle case costruttrici SEOUL e OSRAM.

Le specifiche tecniche dei suddetti LED sono riportate dettagliatamente in *Allegato C*.

A seguire indicheremo brevemente le caratteristiche tecniche salienti estrapolate dalle precedenti.

- **SEOUL X42180**

È un PowerLED altamente performante, è studiato per sostenere elevate correnti, fornire un elevato flusso luminoso e un alta luminanza.



Fig.3.6 - PowerLED SEOUL X42180

All'interno della famiglia di PowerLED SEOUL X42180, è stato preso in considerazione il PowerLED S42180H, ossia la tipologia di LED che fornisce una luce "Bianco Naturale".

Questo PowerLED, per un funzionamento standard a temperatura ambiente $T_A = 25^\circ\text{C}$ e una corrente circolante "Forward current" $I_F = 350\text{mA}$ ha le seguenti caratteristiche:

Flusso luminoso ϕ : 84lm

Temperatura di colore CCT: 4000K

Indice di resa cromatica R_a : 80

Tensione applicata V_F : 3,25V (min. 3,0V ÷ max. 4,0V);

Angolo di emissione β (o $2\Theta \frac{1}{2}$): 124 deg.

Parametri massimi per corretto funzionamento:

Corrente circolante I_F : 800mA;

Potenza dissipata P_d : 3,2W;

Temperatura di giunzione: 145°C ;

Temperatura di funzionamento: $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$

Lo spettro di questo tipo di PowerLED (*Fig.3.7*) avrà una forma più sinuosa e ampia (presenta tre "gobbe" invece che due come un LED tradizionale), spaziando fra differenti lunghezze d'onda e fornendo un'ottima resa cromatica.

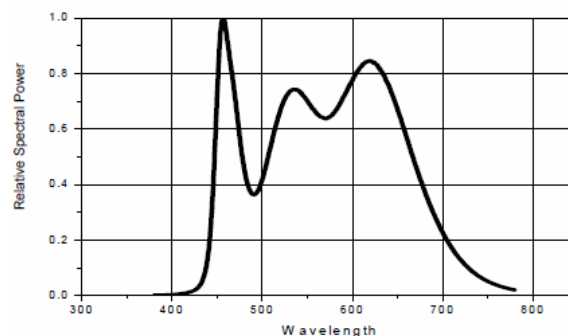


Fig.3.7 - Spettro PowerLED SEOUL X42180

- **SEOUL KWT801-S**

Questo LED, di dimensioni più ridotte rispetto al precedente, è caratterizzato anch'esso da un'alta luminosità sebbene di valore minore rispetto al PowerLED precedente.

Il chip è composto da AlInGaP e InGaN, il package è stato studiato in modo tale da aver componenti di grande affidabilità per poter lavorare in un grande intervallo di temperature.

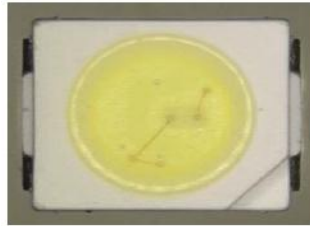


Fig.3.8 - LED SEOUL KWT801-S

Per un funzionamento standard a temperatura ambiente $T_A=25^\circ\text{C}$ e una corrente circolante $I_F=20\text{mA}$ ha le seguenti caratteristiche:

Tensione applicata V_F : min. 3,0V ÷ max. 3,3V)

Corrente inversa I_R (con $V_R=5\text{V}$): 50 μA

Intensità luminosa I_V : 1500mcd < I_V < 1800cmd

Angolo di emissione β (o $2\Theta^{1/2}$): 120 deg.

Parametri massimi per corretto funzionamento:

Corrente circolante I_F : 30mA;

Potenza dissipata P_d : 120mW;

Temperatura di funzionamento: $-40^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$

- **OSRAM LW E67C**



Fig.3.9 - LED OSRAM LW E67C

Parametri caratteristici indicati per un funzionamento alla temperatura ambiente $T_A = 25^\circ\text{C}$ e una corrente circolante $I_F = 30\text{mA}$:

Efficienza luminosa η : 20 lm/W

Temperatura di colore CCT: 5600 K

Indice di resa cromatica R_a : 80

Tensione applicata V_F : 3,9 V (min. 3,25V ÷ max. 4,35V);

Corrente inversa I_R (con $V_R=5\text{V}$): 0,01 μA (max. 10 μA)

Angolo di emissione β (o $2\Theta \frac{1}{2}$): 120 deg.

Parametri massimi per corretto funzionamento:

Corrente circolante I_F ($T_A=25^\circ\text{C}$): 30mA;

Potenza dissipata P_d ($T_A=25^\circ\text{C}$): 135mW;

Tensione inversa V_R ($T_A=25^\circ\text{C}$): 5V;

Temperatura di giunzione: 110° C;

Temperatura di funzionamento: $-40^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$

3.3 Azienda e produzione

L'azienda ProLight di Falzes (BZ) nasce nel febbraio del 2000 e si occupa principalmente di progettazione, sviluppo e realizzazione d'impianti d'illuminazione innovativi ad elevato livello tecnologico.

L'azienda gode di una certa autosufficienza e versatilità da un punto di vista di produttivo; si tende ad uno sviluppo interno del prodotto finale rifornendosi da fornitori esterni solamente di materiali "primi" per poi lavorarli ed assemblarli attraverso l'uso di macchinari appositi.

ProLight possiede quindi una certa libertà di progettazione e produzione, fornendo al cliente un prodotto sempre vicino alle esigenze.

I materiali "primi" che vengono acquistati sono generalmente:

- Sezioni di laminati inox, pieni o forati (per la struttura dell'apparecchio);
- Lenti diffondenti, sezioni di plexi (PMMA, per l'ottica degli apparecchi illuminanti);
- Schede con circuiti stampati, preventivamente progettati secondo specifiche esigenze;
- Componenti elettronici: resistenze, circuiti integrati, induttanze, capacità, etc. etc.
- Rulli (*label*) di LED di differenti tipologie e caratteristiche.

L'azienda è strutturata su due livelli.

La parte inferiore è dedicata interamente ciò che interessa realizzazione metallurgica: un officina con macchinari per il taglio, piegatura e lavorazione a caldo delle barre e dei pezzi di inox ha lo scopo di fornire la struttura dell'apparecchio illuminante e fornire tutti i pezzi concernenti il fissaggio e montaggio di questo.

Al piano superiore, avviene:

- La progettazione, tanto della struttura metallica, quanto dei circuiti stampati e dell'installazione elettrica;
- L'assemblaggio delle stringhe LED tramite macchinari computerizzati;
- La prova fotometrica degli apparecchi illuminanti tramite un laboratorio illuminotecnico dotato di tutta la strumentazione necessaria: sfera di Ulbricht di diametro 2m, goniofotometro posto in una sala non riflettente di dimensioni standardizzate, luminanzometri e luxmetri.
- Controllo di qualità prodotto finito;
- Progettazione luminosa con software.

Nel periodo di raccolta dati trascorso nell'azienda ospitante, si è avuto modo di assistere al meccanismo di produzione dei moduli di apparecchio illuminante; in particolar modo dell'assemblaggio delle stringhe LED.

I rulli di LED (*label*) di differenti caratteristiche tecniche (termiche, elettriche e ottiche) vengono acquistati da grandi produttori quali OSRAM e SEOUL nel caso in esame.

Si studiano vari circuiti stampati a seconda delle esigenze: nel caso in esame le stringhe di circuito stampato vengono progettate affinché risultino in parallelo elettrico fra loro, in modo tale da assicurare continuità anche in caso di guasto.

La tensione applicata ai capi delle stringhe LED è una tensione costante di 24Vd.c.

La corrente cui ogni stringa è attraversata è una corrente continua stabilizzata (vedi §2.4).

Come già accennato, la produzione fisica delle stringhe avviene in un'azienda esterna associata, la quale fornisce le stringhe “nude” pronte per essere assemblate con i LED e i componenti elettronici necessari al funzionamento.

Un software programmato, abbinato ad una macchina robot per la collocazione dei componenti sulla stringa è il primo step della catena di produzione.

Il software, abbinato al macchinario, contiene fra le righe del suo codice:

- le coordinate dei singoli pezzi da collocare sulle stringhe di circuito stampato;
- le coordinate dei contatti posizionati sul circuito stampato;
- le misure di ogni tipologia LED appartenente ad ogni Label presente.

Le indicazioni su esposte sono necessarie per una corretta individuazione dei componenti dal braccio meccanico.

Le stringhe sono quindi impilate in un box e automaticamente richiamate dal macchinario

La macchina robot distribuisce sui contatti dei circuiti stampati una “colla” su cui un braccio meccanico andrà a posizionare con precisione e velocità i singoli componenti (LED, resistenze, circuiti integrati).

All'uscita da questo primo macchinario, il circuito stampato non è ultimato, i componenti non risultano elettricamente connessi al circuito, il “prodotto”, quindi, dovrà entrare direttamente in un altro macchinario costituito da un “forno”, dove avverrà l'effettiva saldatura degli oggetti sulla stringa di circuito stampato.

Questa macchina, infatti, non fa altro che eseguire un progressivo riscaldamento per effettuare la saldatura omogenea ed efficiente, seguito da un altrettanto progressivo raffreddamento per non creare shock termici ai componenti e ai materiali.

In uscita si avrà il prodotto ultimato, completo e perfettamente saldato.

Questo procedimento meccanizzato velocizza notevolmente la produzione delle stringhe LED, altrimenti molto complesse, numerose e minute da saldare.

Vengono sempre eseguiti controlli visivi ai macchinari e al loro corretto funzionamento affinché non vengano perse grosse partite di produzione per un errore o un piccolo difetto di assemblaggio dovuto ai meccanismi automatizzati.

Uno dei controlli manuali eseguiti pragmaticamente su ogni stringa LED consiste nell'applicare i 24Vd.c. tramite un analizzatore (tester) e controllare che la corrente regolata circolante non superi i valori desiderati (ad esempio circa 30mA per i LED LW E67C - OSRAM e circa 20mA per i LED KWT801-S - SEOUL).

L'importanza di questo passaggio è fondamentale per non fornire un prodotto con errori, dato che trattandosi di piccoli componenti elettronici potrebbe capitare un difetto di fabbricazione o un difetto di saldatura che ne comprometterebbe il corretto funzionamento.

Grazie alla disponibilità dei laboratori fotometrici presenti in loco, la stringa e l'apparecchio illuminante potrà essere sottoposta ai più svariati test fotometrici, aumentando la specializzazione dell'azienda in questo settore e proponendo sul mercato soluzioni e migliorie tecniche sempre più performanti.

Capitolo 4

Descrizione sito: galleria di futura costruzione

4.1 Progettazione nuove linee AV/AC

La tesi si è svolta in collaborazione con la società Italferr del gruppo ferrovie dello stato Italiane cui sono affidate le operazioni di progettazione, controllo e la realizzazione delle nuove linee AV/AC.

Italferr opera su tutto il territorio nazionale e all'estero nel settore dei trasporti ferroviari, tradizionali, ad alta velocità e metropolitani; la sua attività si estende anche ad altri sistemi di trasporto e a tutti i settori ingegneristici complementari.

Per contribuire in maniera forte e consapevole allo sviluppo di una mobilità sostenibile, Italferr ha definito una politica ambientale basata su precisi criteri di responsabilità orientati alla conservazione e valorizzazione del territorio nelle sue valenze ambientali e sociali; è inoltre la prima stazione appaltante in Italia ad aver conseguito l'accreditamento come Organismo di Ispezione.

Attraverso una struttura dedicata effettua la verifica (validazione) sui progetti di ingegneria civile e delle relative opere impiantistiche, sviluppati al suo interno e per tutte le Società del Gruppo; il metodo (Value Engineering) analizza differenti soluzioni progettuali mirate a massimizzare il rapporto tra la fruibilità funzionale dell'opera e i costi dell'investimento.

Italferr elabora studi specialistici (analisi di rischio, procedure per la gestione delle emergenze, rapporti di sicurezza, ecc.) al fine di assicurare il livello di sicurezza delle infrastrutture in corso di progettazione e di realizzazione (ad es. le gallerie).

La società progetta e coordina tutte le attività di ingegneria relative ai sistemi tecnologici (impianti di energia e trazione elettrica, impianti di sicurezza, sistemi di comando e controllo della circolazione ferroviaria standard e innovativi, telecomunicazioni standard e innovative) al fine di garantire la funzionalità, le attivazioni e la messa in servizio degli impianti e, per le tratte alta velocità, le caratteristiche di interoperabilità a livello europeo (STI).

4.2 Gallerie di valico

In riferimento alle tratte internazionali di valico è stato eseguito uno studio per valutare soluzioni innovative con obiettivo di ridurre il consumo energetico e i costi di manutenzione e di impianto, prestando inoltre particolare attenzione al ciclo di vita (LCA – Life Cycle Assessment).

L'analisi del ciclo di vita è una metodologia di analisi che valuta un insieme di interazioni che un prodotto o un servizio ha con l'ambiente, considerando il suo intero ciclo di vita che include i punti di preproduzione (quindi anche estrazione e produzione dei materiali), produzione, distribuzione, uso (quindi anche riuso e manutenzione), il riciclaggio e la dismissione finale. La LCA è riconosciuta a livello internazionale attraverso alcune norme ISO (International Organization for Standardization).

L'uso dei LED in questo tipo di applicazioni avrebbe un riscontro favorevole anche in relazione al LCA; infatti i LED sono considerati una sorgente luminosa “verde”, una tipologia di sorgente a ridotto impatto ambientale; ossia una tecnologia che incide meno di altre in termini di inquinamento dell'aria, dell'acqua di produzione rifiuti e consumo di risorse durante tutto l'arco della propria vita, dalla culla alla tomba.

Ciò va a vantaggio rispetto alle attuali lampade fluorescenti installate nelle gallerie in esercizio, il cui LCA, non è totalmente “verde” per la presenza di mercurio: metallo estremamente inquinante. Dopo l'uso, infatti, devono essere smaltite in maniera differenziata tra i materiali RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche).

Per realizzare un'analisi tecnico-economica compiuta dell'innovativo sistema di illuminazione di sicurezza, è stata individuata una galleria tipo di ultima generazione, esemplificativa di quella che può essere un'applicazione effettiva.

L'infrastruttura si differenzia in vari aspetti dalle gallerie realizzate negli anni passati; rispettando in qualità di sicurezza ed operabilità il DM [28-10-05] e la STI.

Per caratterizzare il *sistema galleria* consideriamo nell'ordine i seguenti parametri:

- Lunghezza della galleria; la galleria in esame a doppia canna e singolo binario sarà di una lunghezza di 55 km.
- Volume di traffico; è previsto un volume di traffico pari a 10 convogli/ora
- Tipologia di traffico; la tipologia è destinata al trasporto di presone;
- Presenza o assenza di deviatori in galleria; sono presenti deviatori in galleria;
- Interconnessioni in galleria; i collegamenti by-pass trasversali, previsti almeno ogni 500m, fra le due gallerie indipendenti e parallele permettono di utilizzare la galleria adiacente come area di sicurezza, come via di esodo e come accesso delle squadre di emergenza. Le dimensioni minime dei collegamenti trasversali sono di 2,25 m. di altezza e 1,50 m. di larghezza.

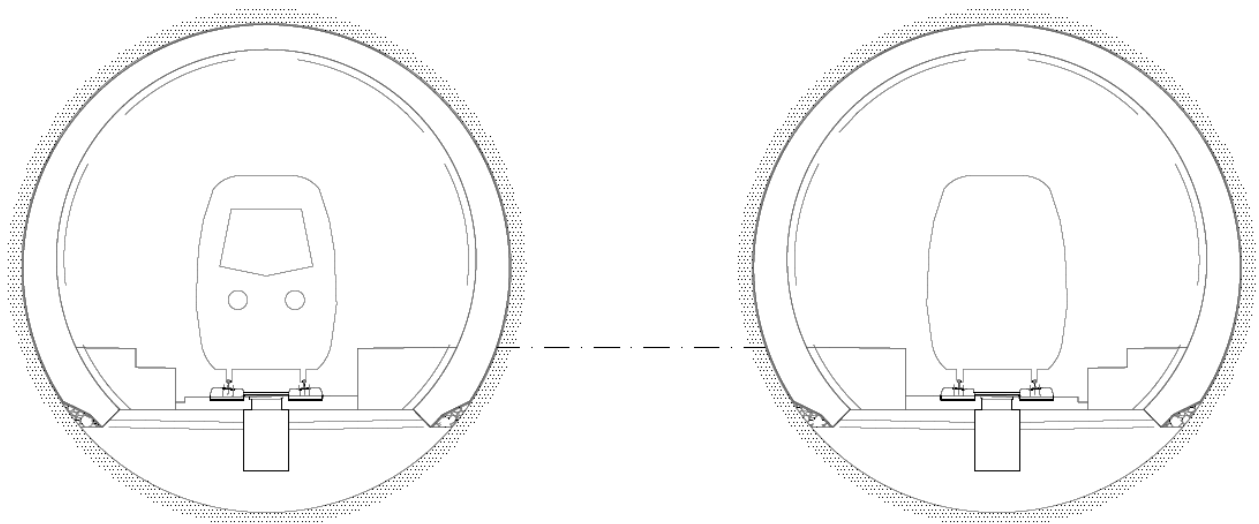


Fig.4.1 - Galleria di valico a doppia canna: binario pari e binario dispari

Per tale collegamento è previsto l'attivazione di un impianto per la sovrappressione evita che in presenza di un incendio si abbia propagazione di fumi.

Inoltre i collegamenti tra le due gallerie devono essere di dimensioni almeno pari a 100m^2 calpestabili, idonei a contenere la sosta provvisoria di viaggiatori esodanti in presenza di circolazione ferroviaria nella canna attigua.

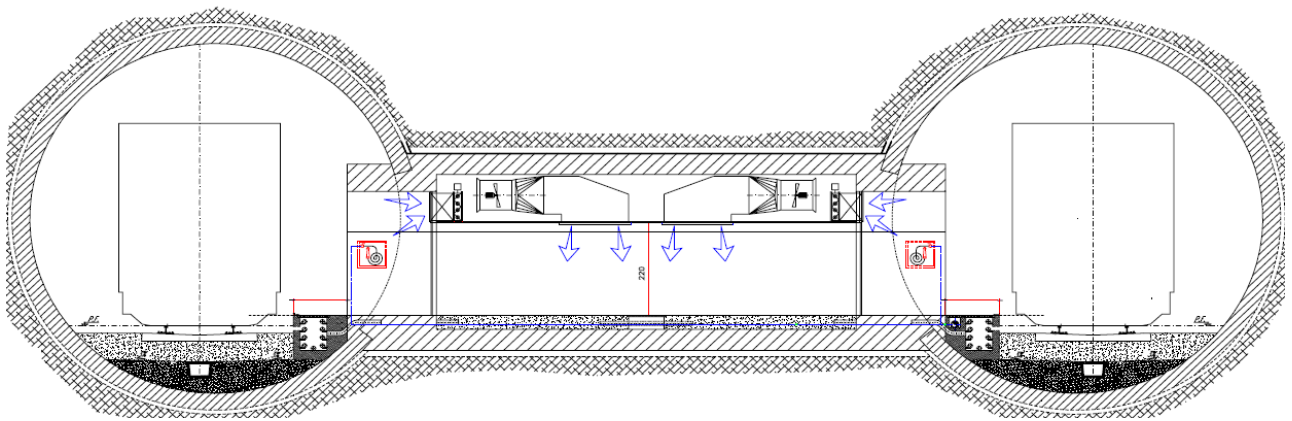


Fig.4.2 - Galleria di valico a doppia canna: binario pari e binario dispari e interconnessione con collegamento trasversali by-pass

- Stazioni o fermate lungolinea in galleria; non sono presenti stazioni o fermate in galleria.
- Possibilità di incrocio in galleria tra treni in transito; essendo una galleria a doppia canna e a singolo binario per canna è escluso il rischio di incidenti per incrocio di convogli.
- Andamento altimetrico; l'andamento altimetrico oscilla tra un $\pm 1\%$
- Localizzazione nel territorio (area urbana/extraurbana); la zona è considerata una zona extraurbana.

- Presenza di aree a rischio specifico in prossimità degli imbocchi; non prevista.

Sempre conformemente alle norme su citate, altri tipi di cambiamenti infrastrutturali nell'ambito della facilitazione dell'esodo interessanti ai fini dei nostri calcoli illuminotecnici riguardano il:

- Marciapiede; la larghezza del marciapiede in questione in base a esigenze di esodo ed accesso delle squadre di soccorso è stata stipulata di 2m (invece che 90cm), per gallerie a singolo binario è sufficiente che sia presente solo su un lato del binario (lato sinistro alla percorrenza del treno).

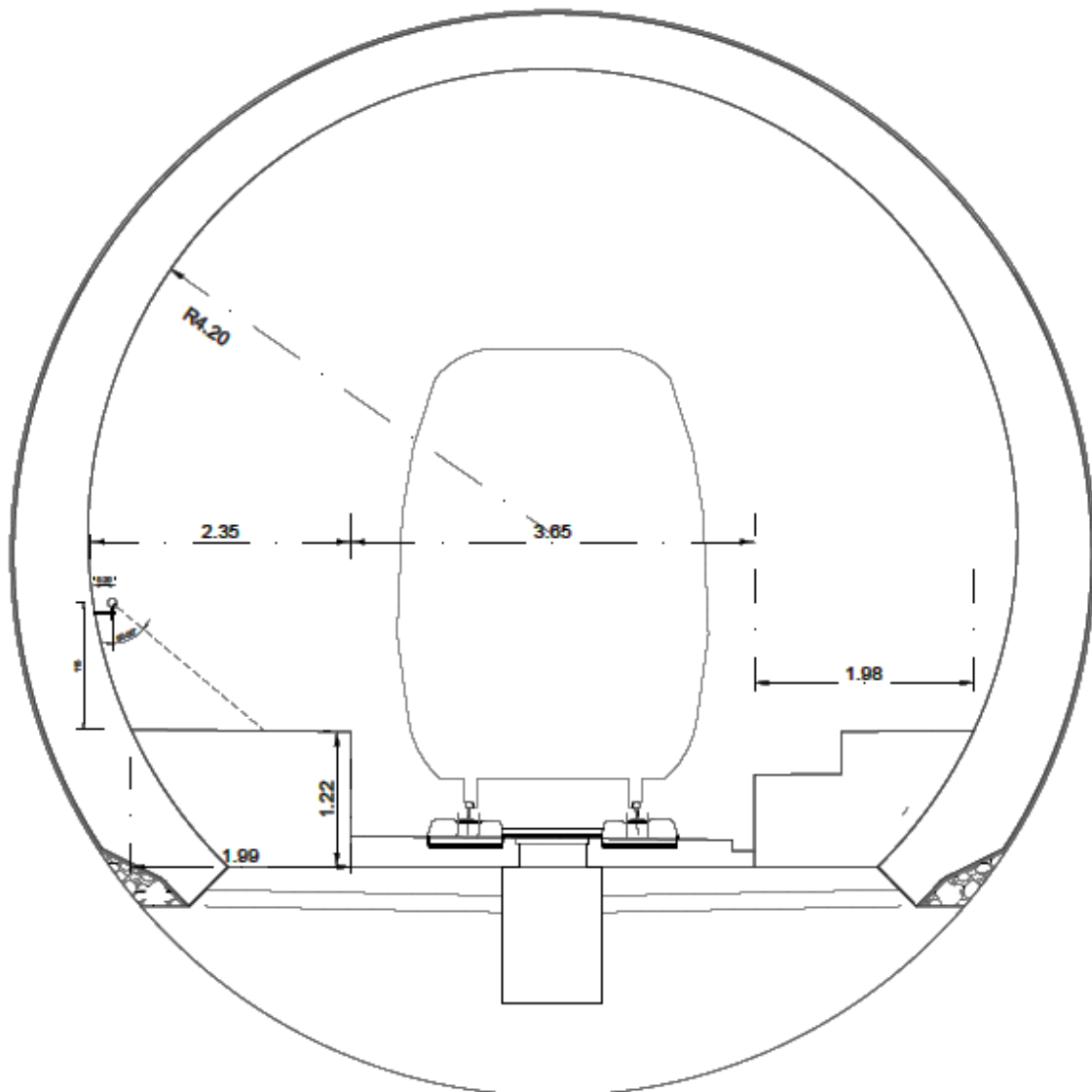


Fig.4.3 - Galleria di valico a doppia canna: dettaglio binario dispari

Per norma deve essere installato un corrimano, al di fuori dello spazio libero minimo necessario per il marciapiede; dato il doppio utilizzo del corrimano quale guida d'esodo verso un'area di sicurezza e elemento illuminante, è stata scelta l'altezza ottimale di 1,15 m dal piano di calpestio.

L'elemento illuminante LED integrato in questione andrebbe a "sostituire" le lampade fluorescenti "compatte" elettroniche a risparmio energetico da 18W, attualmente in uso e alloggiato in corpi illuminanti completi di cavo e alimentatore, connettore multipolare, piastra di ancoraggio, poste ad un'altezza di 2.35m, e distanziate 15m l'una dall'altra.

In definitiva, la sostituzione degli apparecchi a fluorescenza con il sistema illuminante a LED porterebbe i seguenti vantaggi:

- Le sorgenti LED sono facilmente smaltibili/riciclabili, a differenza delle lampade fluorescenti. Questi aspetti, relazionati a lunghe gallerie, o ad installazioni di grandi dimensioni in generale, risultano significativi data la grande quantità presente.
- Le sorgenti LED hanno un'accensione istantanea ed un'emissione di flusso nominale nel range di temperatura di funzionamento indicata (generalmente $-40^{\circ}\text{C} \div +100^{\circ}\text{C}$). Si considera la galleria un ambiente con una temperatura media di 15°C ; le lampade fluorescenti impiegano un tempo di accensione maggiore e necessitano di un tempo per arrivare a regime, inoltre, dato le "basse" temperature, questo tipo di sorgente luminosa raramente riesce ad emettere valori maggiori a circa il 70% del suo flusso nominale. Inoltre queste critiche accensioni riducono enormemente la vita media della lampada;
- La vita utile dei LED comprensivi delle schede di circuito stampato, sono state considerate in 100.000 ore, contro le ottimistiche 7000 ore delle lampade fluorescenti.
- Un ulteriore vantaggio dell'utilizzo del sistema innovativo è che si pone sempre al di sotto delle zone di accumulo dei fumi, garantendo così sempre l'illuminazione sui piani considerati. Quest'aspetto non è confrontabile con il tipo d'installazione del sistema tradizionale i cui apparecchi illuminanti potrebbero essere coperti dai fumi, compromettendone così i livelli di illuminamento.
- Un ulteriore confronto tra i due sistemi può essere fatto in considerazione di un guasto ad una lampada. La mortalità di una lampada fluorescente installata nel sistema tradizionale arrecherebbe minimo 30m di zona buia. Caso contrario, nel sistema illuminante a sorgenti LED, la rottura di un LED porterebbe allo spegnimento della sola stringa di appartenenza. Assicurando il servizio alle stringhe adiacenti, il disservizio porterebbe ad una zona di "buio" di soli 45cm; si manterrebbero quindi ottimi livelli di illuminamento.

Capitolo 5

Calcolo preliminare

Prima di cimentarsi nelle prove di misura delle sorgenti, essendo ora a conoscenza delle:

- caratteristiche delle sorgenti LED;
- caratteristiche fisiche degli apparecchi illuminanti;
- dimensioni della galleria dove andranno posizionati;
- obiettivi di illuminamento richiesti dalle normative;

è stato eseguito un calcolo preliminare per valutare i livelli di illuminamento e selezionare in prima approssimazione le stringhe LED più adatte allo scopo.

Il dettaglio del posizionamento dell'apparecchio è il seguente:

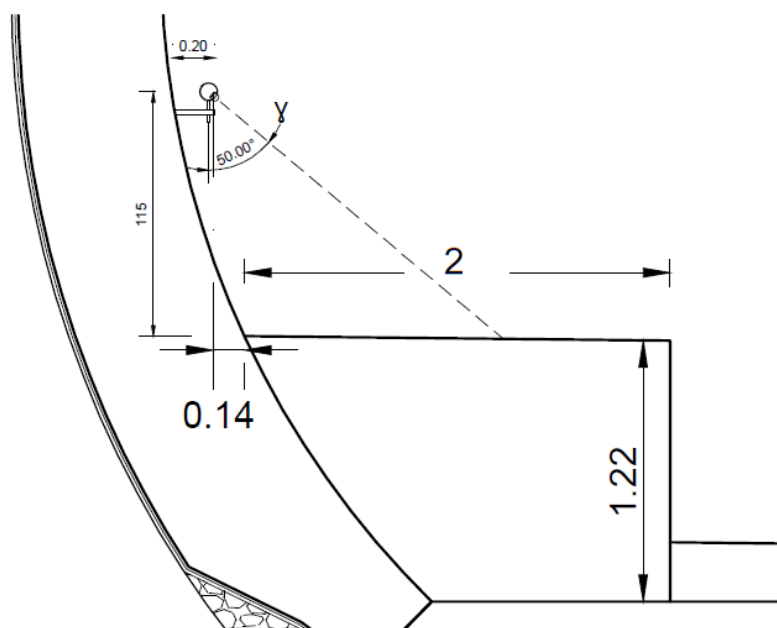


Fig.5.1 - Dettaglio posizionamento corrimano illuminante

L'apparecchio, fungendo anche da corrimano, deve quindi essere pensato in maniera pratica anche per la funzione di sostegno e guida dei soggetti esodanti: si considera installato ad un'altezza di 1,15m, le focali si troveranno a circa 1.12m dal suolo e sarà fissato alla parete curva della galleria ad una distanza di 0,2 m da essa.

Per ottimizzare l'illuminamento sul piano di calpestio l'apparecchio verrà installato ruotato di $\gamma=50^\circ$.

5.1 Apparecchio illuminante con LED OSRAM LW E67C

Il catalogo OSRAM del LED LW E67C (vedi *Allegato C*) fornisce i dati essenziali per effettuare un calcolo preliminare dell'illuminamento medio sul piano di calpestio.

Questo è utile per intuire il suo comportamento in riferimento all'applicazione in esame.

È stato considerato l'utilizzo del LED alla sua potenza nominale; avremmo quindi un flusso luminoso della singola sorgente LED pari a:

$$\Phi_{v\text{SINGOLOLED}} = \eta * P_{\text{SINGOLOLED}} = 20 * 0,135 = 2,7 \text{ [lm]}$$

La stringa di tipo **d**) è formata da 5 LED LW E67C - OSRAM interspaziati fra di loro di 10cm e dalle estremità di 2,5cm; la stringa emetterà un flusso pari a circa 5 volte il flusso luminoso del singolo LED:

$$\Phi_{v\text{STRINGA}} = \Phi_v * 5 = 2,7 * 5 = 13,5 \text{ [lm]}$$

La lunghezza del prototipo di apparecchio illuminante, come visto nel §4, è pari a circa 1m, al cui interno sono collocate due stringhe LED connesse elettricamente in parallelo, il cui flusso emesso è uguale a due volte il flusso emesso da una stringa ($\Phi_{v\text{STRINGA}}$):

$$\Phi_v = \Phi_{v\text{STRINGA}} * 2 = 13,5 * 2 = 27 \text{ [lm]}$$

Si andrà a valutare adesso l'illuminamento medio sul piano di calpestio dato da quest'apparecchio. Conoscendo il flusso emesso pari a 27lm e l'altezza di installazione di 1,15m dal un piano di calpestio (con focali ad altezza di 1,124m), si considera una superficie 1x2m posta sul piano di calpestio.

Si può quindi calcolare il valore dell'indice K:

$$K = \frac{a * b}{h (a + b)} = \frac{1 * 2}{1,15 (1 + 2)} = 0,58$$

Essendo un apparecchio innovativo, non esistono tabelle o curve dello spettro note a priori; in questo caso per ricavare il coefficiente di utilizzazione (U) si considera un apparecchio di forma e caratteristiche simile a quello in esame, ricavando un coefficiente $U = 0,28$. Per risalire a questo valore è stato considerato anche il coefficiente di riflessione delle pareti, in particolare del suolo, ammettendo per il cemento una riflessione pari al 10%. Il fattore di riflessione è stato appositamente considerato sottostimato per simulare la peggiore delle ipotesi; galleria con pareti scurite da polveri e inquinamento, quindi non riflettenti.

Si calcola quindi l'illuminamento medio (E_{v_medio}), considerando un fattore di manutenzione (Mf) uguale a 0,7:

$$E_{v_medio} = \frac{\Phi_v * U * Mf}{a * b} = \frac{27 * 0,28 * 0,7}{1 * 2} = 2,646 [lx]$$

Per determinare esattamente l'illuminamento in punti particolari della superficie si necessita del solido fotometrico dell'apparecchio, poiché come noto, non è possibile applicare l'ipotesi lambertiana: essendo il LED molto direzionale non si ha la stessa intensità di emissione [cd] in tutte le direzioni.

Non si ha modo di conoscere a priori il solido fotometrico dell'apparecchio, poiché si tratta appunto di un apparecchio in sperimentazione.

È possibile tuttavia recuperare, dal database presente in laboratorio, un diagramma fotometrico tipico da una prova effettuata con la medesima tipologia di stringa all'interno della struttura dell'apparecchio illuminante (struttura metallica e ottica PMMA).

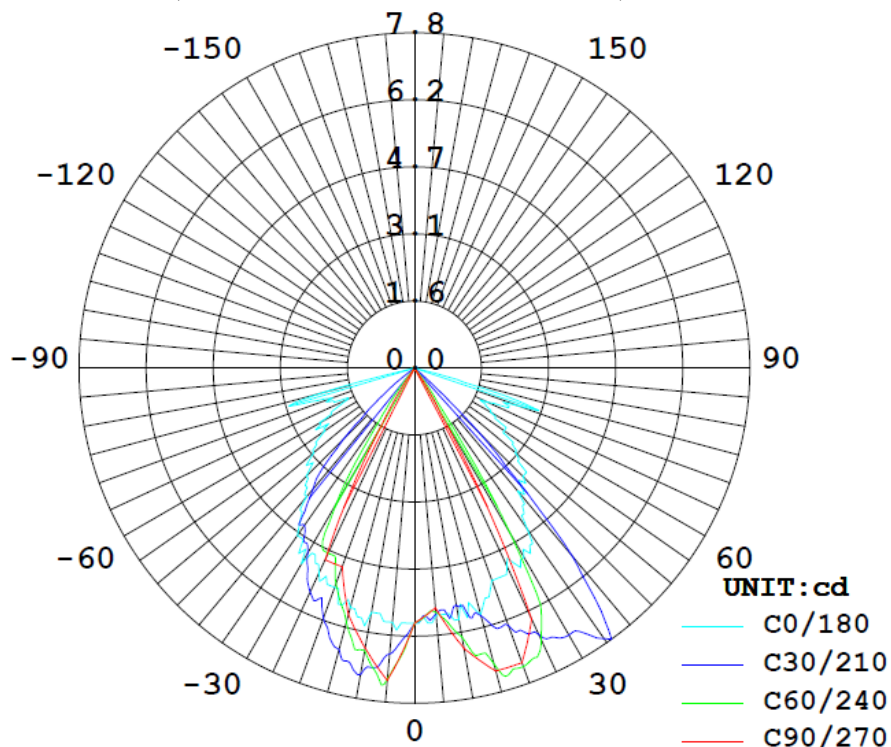


Fig.5.2 - Diagramma fotometrico tipo di LED OSRAM LW E67C

Dal diagramma si nota come, nel piano di sezione C0/180, corrispondente ad una sezione longitudinale dell'apparecchio, si ha una buona uniformità ed una quasi-simmetria del fascio; viceversa nel piano di sezione C90/270, trasversale, l'apertura del fascio è minore e leggermente asimmetrica.

È interessante valutare l'illuminamento nei punti estremi del marciapiede "O" e "P"; per fare ciò si considera il posizionamento nello spazio dell'apparecchio (la sua altezza, l'altezza dei fuochi, la posizione e la rotazione, Fig.5.3) e il relativo diagramma fotometrico di Fig.5.2:

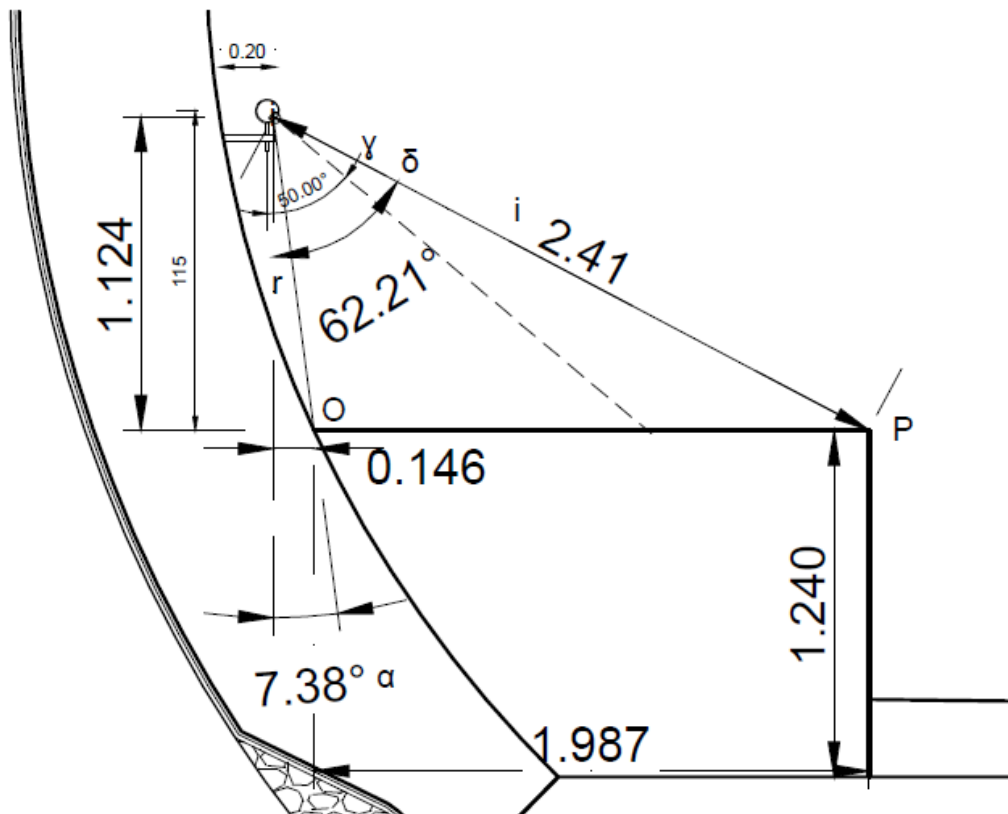


Fig.5.3 - Dettaglio posizionamento corrimano illuminante: misure e inclinazione γ

Si calcola facilmente la distanza "i" e la distanza "r" dal punto centrale della sorgente:

$$i = \sqrt{(1,987 + 0,146)^2 + 1,124^2} = 2,411 \text{ [m]}$$

$$r = \sqrt{0,146^2 + 1,124^2} = 1,133 \text{ [m]}$$

Si calcolano gli angoli compresi fra la verticale e i segmenti "i" e "r":

$$\delta = \arccos \left(\frac{1,124}{2,411} \right) = 62,21^\circ$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{1,124}{1,133} \right) = 7,38^\circ$$

A questo punto si conoscono gli angoli dei punti di interesse e l'inclinazione $\gamma=50^\circ$ dell'apparecchio (vedi Fig.5.3), si trovano i corrispondenti valori di intensità luminosa [cd] nel diagramma dello spettro di emissione:

- $\alpha = 7,38^\circ$;
 $7,38^\circ - 50^\circ = -42,62^\circ$
 si è posizionati nella parte di grafico rispettiva a C90 dove per quest'angolo ($-42,62^\circ$) si ha un'intensità luminosa I_{V_O} pari a 0 cd;
- $\delta = 62,21^\circ$;
 $62,21^\circ - 50^\circ = 12,21^\circ$
 si è posizionati nella parte di grafico rispettiva a 270 dove per quest'angolo ($12,21^\circ$) si ha un'intensità luminosa I_{V_P} pari a circa 7 cd.

Subito si nota che la soluzione non è buona; risulta un valore nullo di intensità luminosa in prossimità del punto "O".

Vengono calcolati in ogni caso i valori di illuminamento nei punti "O" e "P":

- $E_O = \frac{I_{V_O}}{i^2} = 0 [lx]$
- $E_P = \frac{I_{V_P}}{i^2} = 1,20 [lx]$

Si conclude, in prima analisi, che le caratteristiche di questo LED non soddisfano le richieste: si ha un basso valore di illuminamento medio (E_{v_medio}), e un valore prossimo a zero (E_O) sul punto "O". Ad ogni modo si andranno a verificare i valori ottenuti con la misurazione in laboratorio e la simulazione con software, affinché questo calcolo analitico abbia un riscontro pratico.

5.2 Apparecchio illuminante con LED SEOUL KWT801-S

Dal catalogo dei LED SEOUL KWT801-S le caratteristiche principali sono:

$$P_D = 120 \text{ mW}$$

$$I_F = 30 \text{ mA}$$

$V_{SINGOLO_LED} = 4V$; il catalogo del LED pone una tensione inversa=5V, questa è la massima tensione che si può applicare.

Per non accorciare la vita al LED, non verrà utilizzato al 100% della sua potenza; si considera di utilizzarlo a circa il 20% in meno. Considerando l'alimentatore elettronico che trasforma 230Va.c./24Vd.c. si avrà ai capi della stringa con 5 LED (distanti 10 cm tra di loro e 2,5 cm dalle estremità) una tensione di 24Vd.c.

$$P_D = 100 \text{ mW}$$

$$V_{\text{SINGOLO_LED}} = 24/5 = 4,8\text{V}$$

$$I_F = P_D / V_{\text{SINGOLO_LED}} = 21 \text{ mA}$$

A differenza del catalogo OSRAM le caratteristiche dei LED SEOUL non forniscono l'efficienza luminosa, bensì l'angolo di emissione [deg] e l'intensità luminosa [cd] per una corrente circolante $I_F = 20 \text{ mA}$:

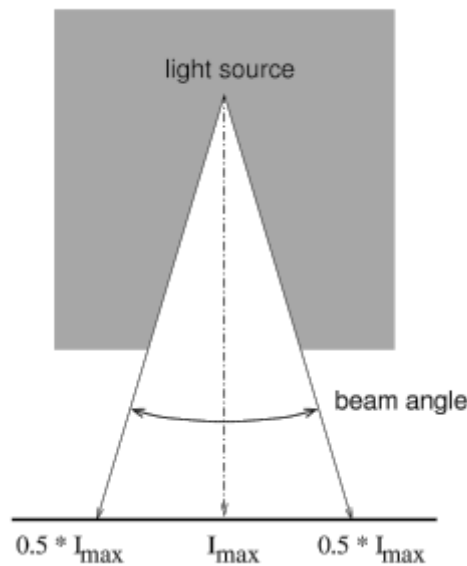


Fig.5.4 - Significato Beam Angle (angolo di emissione)

Angolo di emissione (Beam Angle) = 120°; questo è l'angolo tra due direzioni per le quali l'intensità luminosa è il 50% della massima intensità misurata in un piano per mezzo della direzione centrale (Fig.5.4). L'angolo di emissione di una lampada da un'idea di come la luce si diffonde dalla direzione centrale.

$$I_{v_MAX} = 1800 \text{ [mcd]}$$

;

$$I_{v_MIN} = 1500 \text{ [mcd]}$$

Applicando semplicemente la conversione 1 candela = 1 lumen/steradiante e convertendo l'angolo di emissione in un angolo solido di unità [sr] si ottiene la luminanza [lm] dei LED:

$$sr = 2\pi \left(1 - \cos \left(\frac{\text{AngoloEmissione}}{2} \right) \right) = 3,14 \text{ [sr]}$$

Per determinare il flusso [lm] si applicherà la formula:

$$\Phi_v = I * sr = [lm]$$

Da cui:

$$\Phi_{v_{MAX}} = I_{MAX} * sr = 5,652 [lm]$$

$$\Phi_{v_{MIN}} = I_{MIN} * sr = 4,712 [lm]$$

Facendo la media dei valori si ottiene:

$$\Phi_{v_{LED}} = 5,182 [lm]$$

$$\Phi_{v_{STRINGA_{LED}}} = 5,182 * 5 = 25,91 [lm]$$

L'efficienza luminosa η dimostra essere notevolmente maggiore di quella dei LED precedenti:

$$P_{D_{STRINGA}} = P_D * 5 = 0,1 * 5 = 0,5 [W]$$

$$\eta = \frac{\Phi_{v_{STRINGA_{LED}}}}{P_{D_{STRINGA}}} = \frac{25,91}{0,5} = 51,82 \sim 52$$

Analogamente al caso precedente, riportandosi alla struttura dell'apparecchio comprendente due stringhe, quindi 10 LED:

$$\Phi_v = L_{STRINGA_{LED}} * 2 = 25,91 * 2 = 51,82 [lm]$$

Si considera l'apparecchio illuminante posizionato come nel §5.1; di conseguenza non cambieranno le misure degli angoli e delle distanze.

$$E_{v_{medio}} = \frac{\Phi_v * U * Mf}{a * b} = \frac{51,82 * 0,28 * 0,7}{1 * 2} = 5,078 [lux]$$

Il livello di illuminamento di 5,078lx risulta maggiore del precedente valore di 2,646lx del §5.1 con LED OSRAM, ed è quindi possibile considerare in prima analisi accettabile questo valore.

Con l'ausilio del solido fotometrico si trovano i valori di illuminamento nei punti "O" e "P" con la medesima procedura del caso precedente.

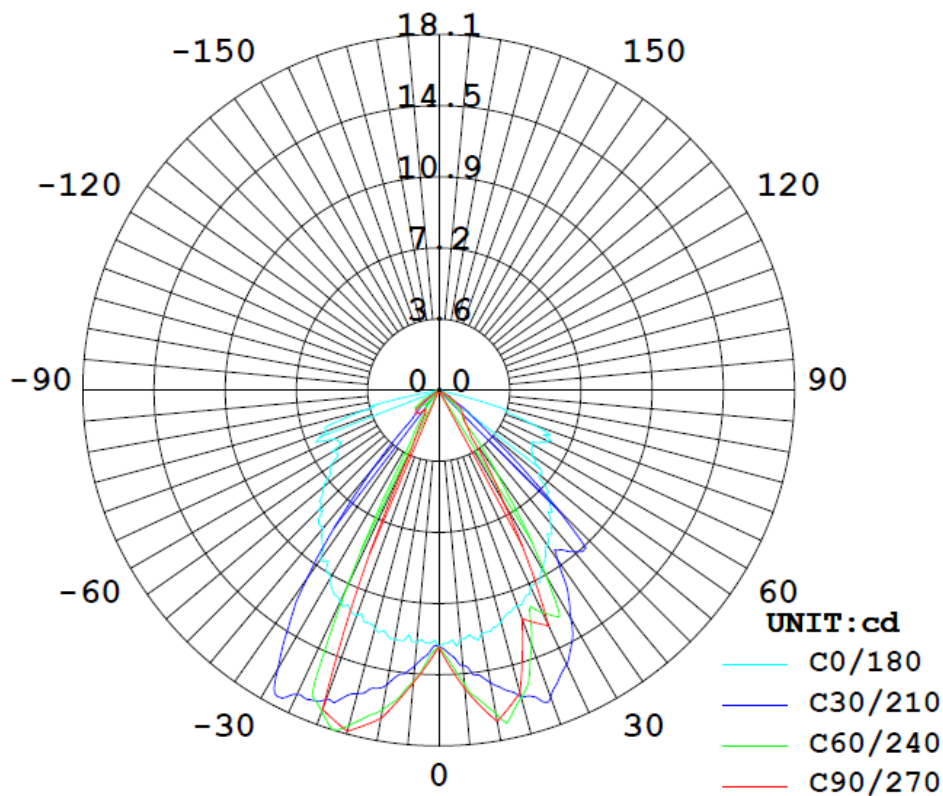


Fig.5.5 - Diagramma fotometrico tipo di LED SEOUL KWT801-S

- $\alpha = 7,38^\circ$;
 $7,38^\circ - 50^\circ = -42,62^\circ$
 si è posizionati nella parte di grafico rispettiva a C90 dove per quest'angolo si ha un'intensità luminosa I_{V_O} pari a 1,6 cd;
- $\delta = 62,21^\circ$;
 $62,21^\circ - 50^\circ = 12,21^\circ$
 si è posizionati nella parte di grafico rispettiva a 270 dove per quest'angolo si ha un'intensità luminosa I_{V_P} pari a circa 17 cd.

I valori di illuminamento nei punti sono calcolabili:

- $E_O = \frac{I_{V_O}}{i^2} = 2,90 [lx]$
- $E_P = \frac{I_{V_P}}{i^2} = 1,244 [lx]$

Questi valori di illuminamento possono inizialmente essere considerati soddisfacenti e compienti i requisiti minimi indicati dalle normative. A tal riguardo si proseguirà analizzando dettagliatamente questa specifica tipologia di sorgente LED abbinata alla struttura dell'apparecchio illuminante.

Come già accennato, per la procedura di misurazione in laboratorio si effettueranno delle misure sulle due stringhe LED in questione in una sfera di Ulbricht per valutarne le caratteristiche quali:

- I parametri di colore CIE;
- I parametri fotometrici, quali flusso e efficienza;
- I parametri elettrici;

Successivamente verrà misurato 1m di apparecchio illuminante, avente come sorgente le due stringhe LED, attraverso un goniometro per definirne il diagramma di distribuzione di intensità (solido fotometrico).

Conclusivamente le curve fotometriche elaborate saranno introdotte nel software Dialux per simulare l'installazione in galleria dell'apparecchio sviluppato.

Nota:

Di proposito si è tralasciato il calcolo di massima dei LED SEOUL X42180: in primo motivo per non peccare di ridondanza in secondo, questi tipi di LED, sembrano miglior adattarsi a soluzioni più esigenti rispetto ad un'installazione in galleria.

Questi LED possiedono infatti un elevato flusso luminoso (che nel caso in esame potrebbe essere superfluo, se non eccessivo), un'ottima resa cromatica, un assorbimento di potenza più elevato (otto volte maggiore) e un costo spropositato considerando il numero di LED che necessiterebbero per illuminare 55km di galleria e il costo di listino di questo singolo LED

Ad ogni modo queste assunzioni verranno motivate da una prova in sfera di Ulbricht del suddetto LED, per verificarne la veridicità.

Capitolo 6

Misurazione

Entrando sempre più nello specifico di questo studio sperimentale si è dapprima effettuata la misurazione delle stringhe LED in analisi attraverso una **sfera integratrice** (sfera di Ulbricht) situata nel laboratorio fotometrico dell'azienda ospitante.

L'obiettivo è quindi ricavare un report indicante, non solo il flusso nominale emesso dalle sorgenti LED (parametro fortemente caratterizzante), bensì anche:

- Caratteristiche CIE dei parametri di colore
 - Coordinate cromatiche;
 - Temperatura di colore T_C ;
 - Picco nello spettro di emissione;
 - Lunghezza d'onda dominante;
 - Percentuale di purezza;
 - Rapporto percentuale tra i colori primari RGB (Red, Green, Blue).
- Indice di resa cromatica
 - Indice di resa cromatica Ra' (valuta la resa di tutti i 14 campioni di colore);
 - Indice del colore Ra (valuta la media aritmetica degli 8 indici generali);
 - Valore degli 8 campioni teorici generali [1 ÷ 8];
 - Valore degli 6 campioni speciali [9 ÷ 14].
- Parametri fotometrici
 - Flusso nominale;
 - Efficienza;
 - Potenza luminosa.
- Parametri elettrici
 - Tensione ai capi della stringa;

- Corrente ai morsetti di ingresso;
- Potenza;
- Fattore di potenza.
- Stato della strumentazione
 - Nome strumentazione di misura;
 - Numero di referenza misura;
 - Intervallo minimo di misurazione;
 - Intervallo generale di misurazione (spettro visibile umano 380nm÷780nm);
 - Temperature d'esercizio.

Con questi dati risultanti dalla misurazione andremo innanzitutto a verificare l'attinenza ai dati ottenuti dal calcolo preliminare.

Successivamente le stringhe LED di ogni differente tipologia, verranno inserite nella struttura dell'apparecchio e misurate in un ambiente totalmente non riflettente attraverso una **strumentazione goniofotometrica** studiata per determinare il diagramma fotometrico, ossia il solido fotometrico, dell'apparecchio illuminante completo di ottica.

La strumentazione misurerà tuttavia anche il flusso nominale dell'apparecchio: questo valore si andrà a modificarlo, avendo a disposizione un dato preciso e oggettivo di misurazione di flusso nominale emesso dalle sorgenti ottenuto nella precedente misura con sfera integratrice (sfera di Ulbricht).

Indichiamo brevemente i risultati ottenuti nel report:

- Quantità di lampade (consideriamo come "lampada" due stringhe LED da 45cm e contenenti ognuna 5 LED)
- Potenza nominale apparecchio illuminante (1 metro di modello di apparecchio illuminante contenente le due stringhe LED) ;
- Voltaggio;
- Flusso nominale (dato modificato con il valore emerso dalla prova in sfera precedente);
- Candele massime (I_{MAX} [cd]);
- Flusso totale emesso dall'apparecchio illuminante;
- Efficienza apparecchio illuminante;

Grafici e diagrammi:

- Diagramma polare di distribuzione di intensità nel piano C;
- Diagramma cartesiano di distribuzione di intensità nel piano C;
- Diagramma di zone di flusso;
- Diagramma isocandela;
- Diagramma isolux;
- Tabella di distribuzione di intensità luminosa;

Dati di sistema:

- Temperatura;
- Operatore;
- Data test;
- Settaggio test (velocità intervallo misurazione);
- Umidità;
- Distanza del detector dall'apparecchio illuminante.

In ultima analisi verrà verificato, nella sala non riflettente del laboratorio fotometrico, il livello di illuminamento orizzontale dell'apparecchio illuminante completo di ottica e posto, perpendicolarmente alla superficie da misurare, ad un'altezza di 2m da questa.

Si disegnerà sulla superficie un'area quadrata di $1 \times 1 \text{m}^2$ dove, con il **luxmetro** ASITA LX 421, si andrà a misurare il livello di illuminamento in particolari punti per riscontrarne la correlazione fra i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli riscontrati dal software di calcolo Dialux in una situazione omologa.

6.1 Laboratorio fotometrico

Il laboratorio fotometrico consiste in un'area adatta alla misurazione di grandezze fotometriche.

Le caratteristiche di un Laboratorio Fotometrico sono:

- alto grado di ripetibilità locale delle misure sulle lampade e gli apparecchi;
- operare secondo criteri normalizzati prescritti dalle norme tecniche specifiche (vedi UNI 10671)
- strumentazione e i campioni di riferimento:
 - luxmetro, che deve avere una buona approssimazione con la curva fotopica di sensibilità relativa $V(\lambda)$ e un buona precisione $f1$ (vedi §6.4);
 - goniofotometro, stabile, rigido, con buona precisione angolare (vedi §6.3);
 - Multimetro per il controllo dei parametri elettrici della lampada.

L'alimentazione elettrica è garantita da uno stabilizzatore elettronico che regola la tensione e frequenza entro lo 0.1% del valore assegnato.

Nel laboratorio fotometrico il mantenimento delle condizioni ambientali è garantito dalla presenza di un impianto di condizionamento che mantiene la temperatura e l'umidità dentro i limiti previsti,

pur non provocando uno spostamento d'aria che potrebbe nuocere alla riuscita di una misura a regola d'arte (2m/s).

La luce parassita deve essere totalmente eliminata tramite l'impiego di vernici nero opaco per tutte le pareti e tutti gli apparecchi presenti nella sala di rilevazione (goniofotometro, condizionatori).

La sala di controllo è accessoriata di un PC con, principalmente, due software dedicati uno alla sfera integratrice e l'altro al fotogoniometro, collegati tramite porta RS-232. Il collegamento RS-232 al computer crea l'interfaccia tra la stazione di controllo e il controllo di movimento, entrambi integrati nell'armadio di controllo

Il primo software per il settaggio dei parametri di misura della sfera integratrice, l'acquisizione dei dati del sistema ottico-fotometrico, nonché l'elaborazione di un report di risultati.

Il secondo, riguardante il fotogoniometro, incaricato di coordinare i movimenti della struttura meccanica con l'acquisizione di dati, generazione di consegne di posizione e di velocità adeguata, nonché ovviamente acquisizione dati e stampa del report.

Il laboratorio dispone di una serie di apparecchiature di controllo, regolazione e misura.

Tutti gli strumenti di prova sono raggruppati in un armadio di controllo standard da 48.26cm:

- Digital Power Meter (LS2012) – Lisun Group



Fig.6.1 - Armadio laboratorio: Digital Power Meter (LS2012) – Lisun Group

- Misura Vrms, Irms, W, PF/Hz;
- Misura AC, DC, AC+DC;
- Intervallo di voltaggio: AC: 5÷600V, DC: 1÷600V. Intervallo di corrente: AC&DC: 0,005÷20°, Automatico;
- Sensibilità: \pm (0,4% valore letto + 0,1% intervallo + 1 Digit).

- Digital CC and CV DC Power Supply (WP3005) – Lisun Group



Fig.6.2 - Armadio laboratorio: Digital CC and CV DC Power Supply (WP3005) – Lisun Group

- Alta stabilità ed alta sensibilità;
- Regolazione semplice voltaggio e corrente;
- Adatti a fornire potenza DC;
- Intervallo voltaggio di output: 0,005÷50,00V;
- Intervallo corrente di output: 0,005÷5,000A;
- Voltaggio:
 - 30V intervallo: 5V / 10V / 25V / 30V
 - 50V intervallo: 5V / 10V / 25V / 50V
- Risoluzione voltmetro:
 - 0,10001V (0,1111V ~ 10,000V)
 - 0,001V (10,000V ~ 50,000V)
- Sensibilità della tensione e corrente: : $\pm (0,02\% \text{ valore letto} + 0,001\% \text{ intervallo} + 1 \text{ Digit})$;
- Stabilità voltaggio di output: $\pm 0,01\% \text{ valore letto}/3\text{min}$;
- Stabilità corrente di output: $\pm 0,01\% \text{ valore letto}/3\text{min}$;

- AC Power Source (LSP-500VA) – Lisun Group



Fig.6.3 - Armadio laboratorio: AC Power Source (LSP-500VA) – Lisun Group

- Tecnologia conversione frequenza AC-DC-AC;
- Sintesi di onde digitali, tecnologia onde feed-back, distorsione a bassa potenza;

- Controllato e testato da 16 bits MCU con alto grado di automazione;
 - Impedenza zero di output, resistenza equivalente $\leq 0,1$;
 - Intervallo di output di frequenza: 45,00÷65,00 Hz;
 - Intervallo di output di voltaggio: AC 0,0÷300,0V;
 - Distorsione totale voltaggio: $\leq 0,6\%$; Stabilità voltaggio: $\leq 0,1\%/30\text{min}$
 - Indice regolazione carico: $\leq 0,1\%$; Stabilità di frequenza: $\leq 0,005\%/30\text{min}$.
 - Potenza di output 500W;
 - Osservazione:
 - 0 ~ 150V: 4,2A ;
 - 150 ~ 300V: 2,1A ;
- Fibra ottica CFO 1,2m; connette lo spettrofotometro alla sfera integratrice (sfera di Ulbricht).
 - Apparecchiatura sfera integratrice: spettrofotometro colorimetro LMS – 5000 – Lisun Group
 - Alta precisione e velocità di test minori di 10 secondi;
 - Intervallo della lunghezza d'onda dello spettro di emissione: 380nm ~ 800nm;
 - Precisione lunghezza d'onda dello spettro: $\pm 0,2\text{nm}$, riproducibilità della lunghezza d'onda $\pm 0,1\text{nm}$;
 - Step scansione campione: $\pm 5\text{nm}$;
 - Precisione delle coordinate cromatiche ($\Delta x, \Delta y$): $\pm 0,0003$;
 - Temperatura di colore correlata CCT: 1000K ~ 100000K, Precisione CCT: $\pm 0,3\%$;
 - Intervallo dell'indice di resa cromatica: 0 ~ 100,0 , Precisione $\pm (0,3\% \text{ valore letto } \pm 0,3)$;
 - Linearità fotometria: $\pm 0,3\%$, detector fotometria: classe A;
 - Flusso luminoso: 0,01lm ~ 1,999,900lm (fornito di corretta taglia della sfera integratrice);
 - Intervallo di misura di temperatura ambiente: $-10^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$, Precisione $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$;
 - Intervallo di misura di temperatura (nella sfera): $-10^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$, Precisione $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

La sfera integratrice sarà vista in dettaglio nel prossimo sotto capitolo.

- Apparecchiatura per fotogoniometro LSG – 1800 (vedi capitolo riguardante)



Fig.6.4 - Armadio laboratorio



The PC request at least two RS-232 COMs

Fig.6.5 - Dettaglio equipaggiamento laboratorio

6.2 Sfera Integratrice LPCE – 1 LISUN GROUP

Il flusso luminoso complessivamente emesso da una sorgente luminosa può essere misurato mediante la sfera integratrice o sfera di Ulbricht.

Principio di funzionamento

Questo apparecchio si basa sulle ipotesi che se si considera una sfera le cui pareti interne abbiano un fattore di riflessione ρ costante, ossia la superficie sia perfettamente diffondente, peraltro non selettiva, allora l'illuminamento su un qualunque punto interno di tale sfera dovuto alla diffusione non dipende dalla posizione della sorgente ed è proporzionale al flusso luminoso.

Si dimostra infatti che tale illuminamento è pari a:

$$E = \rho\Phi_V / [(1 - \rho)4\pi r^2]$$

dove r è il raggio della sfera

Da tale relazione, misurato l'illuminamento, si valuta Φ_V . Dunque collocando in uno dei punti della superficie interna della sfera un sensore per illuminamento è possibile calcolare il flusso totale.



Fig.6.6 - Laboratorio: sfera di Ulbricht; diametro 2m

Modalità di esecuzione della prova

La sfera di Ulbricht sulla quale abbiamo effettuato le prove è costituita da una lamiera metallica di diametro molto più grande rispetto alle dimensioni della sorgente luminosa misurata (il laboratorio era dotato di una sfera di diametro 2 m); la superficie interna è verniciata con vernice bianca opaca diffondente e non selettiva.

La sorgente in misura viene sospesa al centro della sfera e come abbiamo detto, a causa delle continue riflessioni, l'illuminamento di ogni punto della superficie interna della sfera è costante e proporzionale al flusso totale emesso dalla lampada.

Sulla sfera è praticata un'apertura protetta da un vetro opalino, dietro la quale è posto il fotorivelatore (un luxmetro). La presenza di un schermo opaco impedisce che la cellula del

fotorivelatore sia illuminata direttamente, al fine di evitare quindi che i raggi luminosi, oggetto di misurazione, possano incidere direttamente su di essa, falsando così i risultati.

Gli accessori di sostegno e alimentazione della sorgente dentro la sfera hanno effetto trascurabile; quindi l'illuminamento (E) sulla finestrella B (dovuto alla luce riflessa dalle pareti) è direttamente proporzionale al flusso totale (Φ_v) emesso dalla lampada.

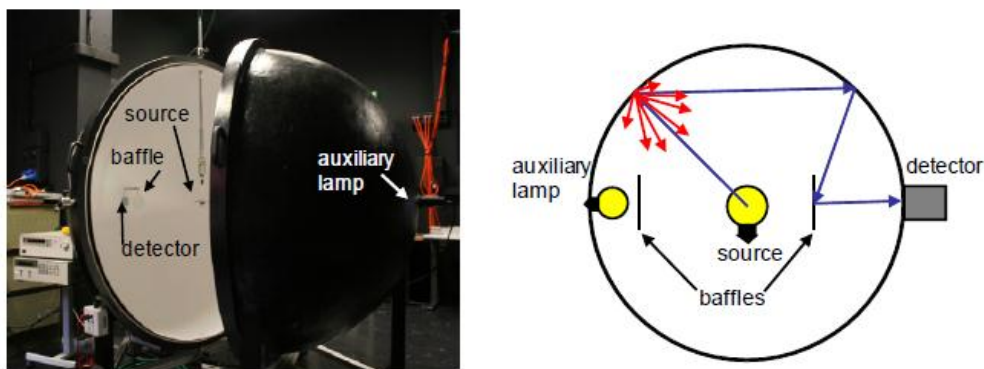


Fig.6.7 - Dettaglio sfera di Ulbricht

La taratura per calibrare lo spettro e il flusso luminoso della sfera di Ulbricht avviene tramite una lampada campione con flusso luminoso noto: OSRAM Standard Lamp 24V/50W.

La taratura viene effettuata, in media, ogni 2 mesi.

6.3 Goniofotometro LSG – 1800 LISUN GROUP

Un'esigenza fondamentale per gli apparecchi illuminanti è quella di determinare la distribuzione dell'intensità luminosa nello spazio (solido fotometrico), in modo tale da poter caratterizzare il flusso luminoso.

Effettuiamo questo mediante uno strumento detto fotogoniometro o fotometro direzionale.

Tale strumento è costituito da una fotocellula che effettua le diverse misure dell'intensità luminosa in varie direzioni dello spazio con una particolare cadenza angolare mediante la variazione della posizione relativa dell'apparecchio rispetto al sensore.

Il fotogoniometro, peraltro, può essere utilizzato anche per valutare in modo molto più accurato rispetto alla sfera integratrice il flusso complessivamente emesso dall'apparecchio oppure, per esempio, la percentuale di flusso che viene emessa in un semispazio o in un determinato angolo solido.

LSG – 1800 è una strumentazione goniofotometrica automatica, che valuta quindi la distribuzione spaziale dell'intensità luminosa con l'agevolazione di ruotare la sorgente luminosa secondo i suoi due assi; longitudinale e trasversale, mantenendo fisso il sensore.

Nello specifico, è utilizzato per misurare i parametri fotometrici dei apparecchi LED:

- le curve spaziali di distribuzione d'intensità;
- le curve spaziali iso-intensità;
- curve d'intensità in ogni sezione (rappresentate tramite un sistema di coordinate cartesiane o polari);
- curve di limitazione di luminanza;
- efficienza luminosa dell'apparecchio;
- grado di abbagliamento;
- angolo di apertura effettivo;
- livelli alti e bassi di flusso luminoso;
- flusso luminoso totale ed effettivo;
- fattore di utilizzazione e parametri elettrici (voltaggio, corrente, potenza, fattore di potenza, etc. etc.).

Il goniometro in questione riesce a testare tutti gli apparecchi illuminanti con dimensioni massime 1,65x1,6 (L x W); è installato in una sala del laboratorio di dimensioni W3,0 x H2,5 x L(8-30)m completamente nera, non riflettente senza infiltrazioni di luce (*Fig.6.8*).

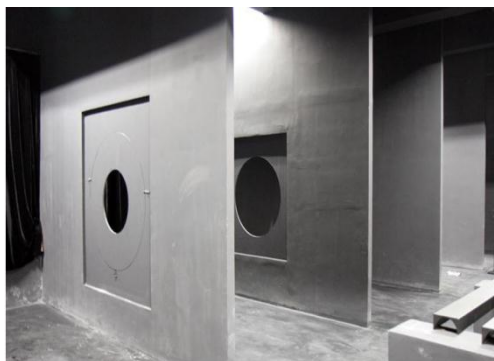


Fig.6.8 - Laboratorio: sala non riflettente

Principio di funzionamento e modalità di esecuzione della prova

L'apparecchio da misurare è installato sul supporto rotante, il cui centro è allineato con il centro del supporto; l'allineamento risulta piuttosto semplice grazie all'aiuto di un laser di centratura.

Il detector fotometrico è fisso e testerà l'intensità luminosa in varie posizioni orizzontali mentre la sorgente luminosa ruota (con velocità di rotazione costante impostata dalla sala di controllo).

La strumentazione meccanica permette, inoltre, di ruotare l'apparecchio-test attorno ad un asse verticale e ad un asse orizzontale. Mentre l'apparecchio-test ruota attorno all'asse orizzontale, il detector, posto allo stesso livello del piano di rotazione, misurerà l'intensità di ogni direzione in quella superficie (*Fig.6.9*).

Quando la rotazione avverrà sull'asse verticale, il detector misurerà l'intensità sulla superficie verticale.

L'asse verticale e orizzontale possono essere continuamente ruotati da -180° a circa $+180^\circ$.

In accordo con i requisiti di misura, il sistema può operare nelle coordinate di rilevamento B- β , A- α e C- γ (Fig.6.10).



Fig.6.9 - Posizionamento goniofotometro e struttura laboratorio

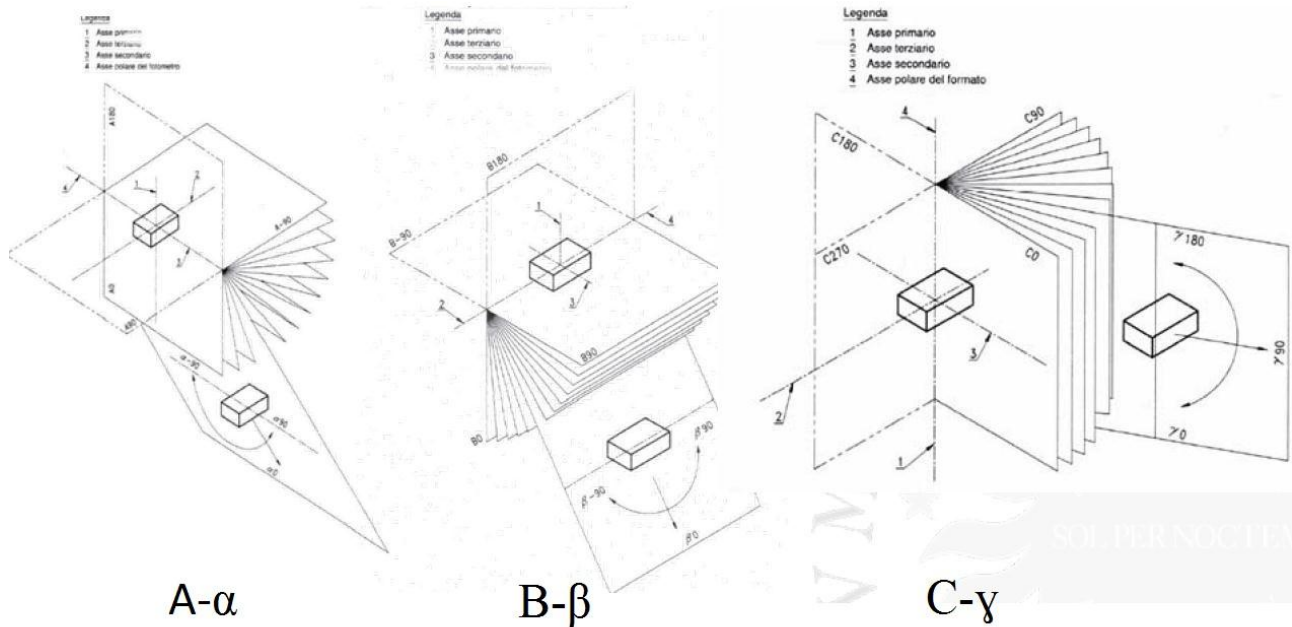


Fig.6.10 - Sistema di rilevamento A- α , B- β e C- γ ; rispettivamente asse di rotazione dei piani A, B e C.

Nel nostro caso di misurazione, di un apparecchio stretto e lungo, si presta più pratica l'inserzione con struttura a doppie braccia (sistema di coordinate B- β , Fig.6.11); in questo modo, avendo considerato anche la difficoltà di un fissaggio centrale (C- γ) stabile e senza oscillazioni

dell'apparecchio durante i movimenti del macchinario goniometrico, si evitano errori di imprecisione nella misura riscontrando una maggiore affidabilità.

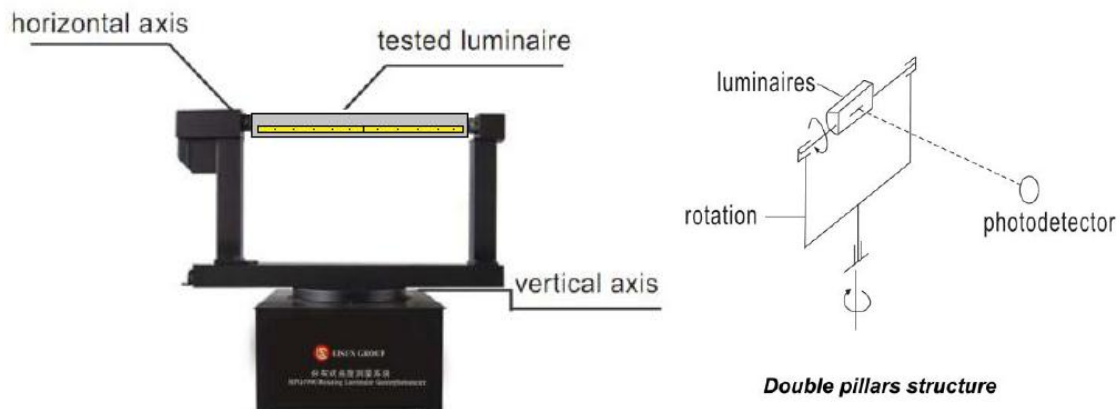


Fig.6.11 - Posizionamento coordinate B- β a doppie braccia

L'asse di simmetria dell'apparecchio, che costituisce l'asse orizzontale del supporto rotante, è coassiale nel sistema di coordinate B- β (verticalmente incrociato nel sistema di coordinate A- α).

Nota: come si vede in Fig.6.9 e 6.8, esiste un disco forato, in prossimità del LSG-1800, denominato "Adjustable Diaphragm" che permette una scelta del diametro interno del disco in base alla lunghezza dell'apparecchio illuminante da misurare. In base a delle tabelle si ricava che per lunghezze di apparecchio-test comprese tra 800mm÷1000mm il diametro interno del *Adjustable Diaphragm* risulta essere di 820mm (L3).

Specifiche tecniche:

- Precisione fotometrica: classe 1 (1%);
- Intervallo test d'illuminamento: da 0,001 lx a 100,000 lx;
- Precisione angolo: 0,01°;
- Portata di rotazione: orizzontale: -180° ~+270°; verticale: -180° ~+180°;
- Precisione elettrica: classe 0,5;
- Risoluzione principale assi goniometrico: 0,0016°;
- L'apparecchio può ruotare da -180 ~ 180° o 0 ~ 360° lungo l'asse verticale;
- L'apparecchio può ruotare da -180 ~ 180° o 0 ~ 360° lungo l'asse verticale;
- Capacità massima degli apparecchi: 5kW/50kg (doppie braccia) e 1,65mx1,6m (LxW);
- Distanza di misurazione: tra 5m ~ 30m.

6.4 Luxmetro LX421 ASITA

Il luxmetro è uno strumento usato per la misurazione dei livelli di illuminazione.

Descrizione e modalità di funzionamento

Tale strumento è dotato di un sensore munito a sua volta di sistemi per correggere l'errore del coseno e per correggere anche la risposta spettrale in modo che sia il più vicino possibile alla curva di sensibilità spettrale dell'occhio umano.

Se la superficie del sensore fosse liscia e piana, per elevati angoli di incidenza della luce, si verificherebbero dei fenomeni di riflessione speculare, che avrebbero come effetto una riduzione della misura. Per ovviare a questo inconveniente si sovrappone al sensore un vetro superficiale opalino diffondente con i bordi rastremati. In questo caso però per angoli di incidenza ancora più elevati si otterrebbero dei risultati maggiori di quelli reali.

Questo viene evitato introducendo una corona esterna opportunamente sagomata che ha la funzione di schermare la radiazione proveniente da direzioni con angoli elevati (superiori a 45°) e deviare i raggi luminosi in modo che incidano perpendicolarmente al piano della cella fotovoltaica (Fig.6.12).

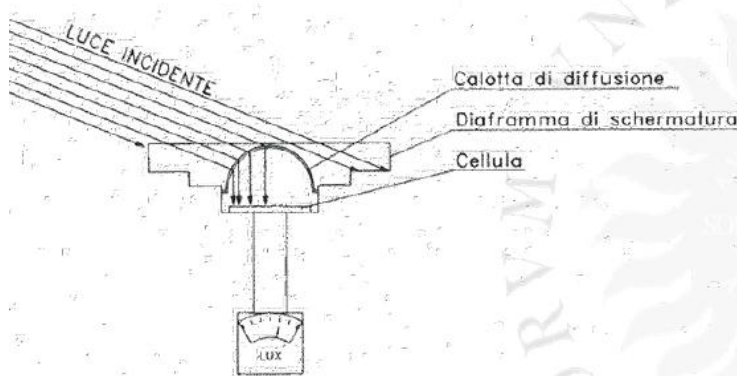


Fig.6.12 - Dettaglio luce incidente e correzione errore del coseno

I parametri caratteristici dei luxmetri sono:

- La deviazione della risposta spettrale dalla funzione $V(\lambda)$;
- La dipendenza della risposta del sensore dall'angolo di incidenza della radiazione;
- La linearità del sensore;
- Errore di lettura;
- La fatica.

Analizzando più in dettaglio il funzionamento del luxmetro vediamo che si impiega una tecnica fotoelettrica, ossia la luce incide su un ricettore costituito di silicio (materiale semiconduttore fotovoltaico) e genera una corrente misurabile in un circuito di misura attraverso un microamperometro (risoluzione anche di 10-14A).

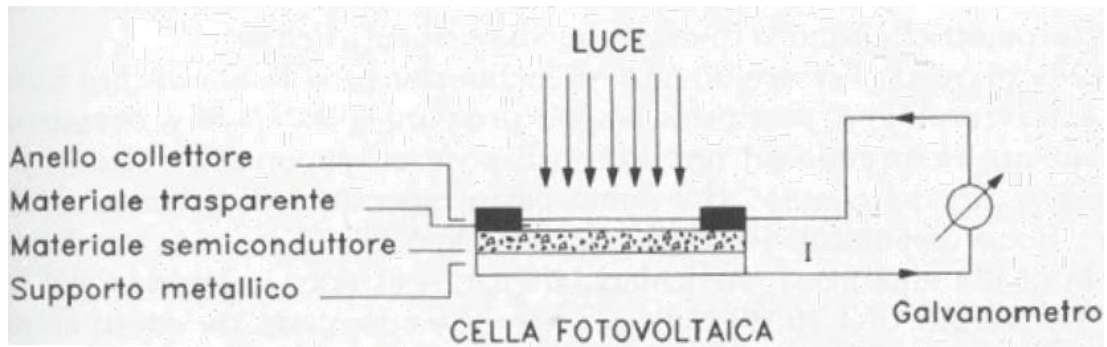


Fig.6.13 - Dettaglio funzionamento luxmetro

La corrente generata risulta proporzionale alla quantità di energia luminosa incidente e quindi la sua misura conduce, mediante opportune scale di conversione, alla misura dell'energia luminosa (Fig.6.13).

Il segnale in microcorrente generato viene amplificato attraverso un amplificatore con uscita in tensione e successivamente viene tradotto in segnale in corrente da un convertitore tensione-corrente (trasporta il segnale senza perdite significative anche con cavi lunghi).

Per descrivere l'efficienza spettrale del flusso luminoso del campo di frequenze tra 380nm e i 780nm, il fotometro deve avere una risposta all'energia luminosa quanto più vicina alla curva fotopica di sensibilità relativa $V(\lambda)$, ovvero, come già precedentemente detto, deve simulare il più possibile l'occhio umano normalizzato dal punto di vista fotometrico. Questo si realizza impiegando dei filtri effettuati sovrapponendo degli strati colorati in modo tale da ottenere una risposta spettrale vicina alla curva $V(\lambda)$.



Fig.6.14 - Immagine luxmetro LX421 ASITA

Caratteristiche Luxmetro LX421 ASITA (Fig.6.14):

- Permette misure tra 0,01 lux e 20.000 lux (la sensibilità minima è limitata dalla corrente di buio e dal rumore termico);
- Precisione elevata e rapidità di risposta;

- Funzione di lettura del display grazie a indicazioni numeriche e simboli;
- Azzeramento automatico;
- Tempi di risposta rapidi, sia in salita che discesa, per tutte le scale.

Specifiche tecniche:

- Display: LCD 3 1/2 dgt.;
- Portate di misura: 20, 200, 2000 e 20000 lux;
- Precisione f1: $\pm 3\% \text{rdg.} \pm 0.5\% \text{f.s.}$ ($\pm 4\% \text{rdg.} \pm 10 \text{dgt.}$ quando $>$ portata 10.000 lux).
(Temperatura colore di taratura: 2856°K);
- Precisione riferita alla reperibilità: $\pm 2\%$;
- Velocità di misura: circa 2 volte/secondo;
- Sensore: fotodiode al silicio con filtro;
- Dimensioni del sensore: 100x60x27mm;
- Temperatura/umidità di esercizio: da 0°C a 40°C (da 32°F a 104°F) /U.R. $<$ 80% ;
- Riferimenti normativi: EMC: CEI EN 61326-1.

6.5 Variabili di influenza nelle misure fotometriche

Luci parassite:

- È indispensabile che il rivelatore fotometrico riceva esclusivamente la luce proveniente dalla sorgente;
- Non devono essere presenti nessun tipo di altre sorgenti luminose e nessun tipo di riflessione all'interno del laboratorio;
- Non devono essere presenti nessun tipo di altre sorgenti luminose e nessun tipo di riflessione all'interno del laboratorio;
- La luce parassita deve mantenersi sotto la soglia 0,5% del flusso luminoso misurato;
- Pareti, pavimenti e tutti gli apparecchi presenti in laboratorio (condizionatori, fari di illuminazione) devono essere trattati con vernici o velluti nero opaco (coefficiente di riflessione $\leq 3\%$), in modo da annullare qualsiasi tipo di luci parassite al suo interno;
- Nel caso che la luce parassita non sia eliminabile, può essere sottratta alle letture eseguite sul raggio diretto (correzione della misura).

Temperatura dell'ambiente:

- la temperatura dell'ambiente in prossimità della lampada o dell'apparecchio di illuminazione, deve essere mantenuta entro i $25 \pm 1^\circ\text{C}$;
- la temperatura influenza notevolmente il flusso luminoso emesso dalla sorgente luminosa (soprattutto per quanto riguarda le lampade fluorescenti, in cui questo effetto si accentua molto di più).

Caratteristiche dell'aria:

- il movimento dell'aria in prossimità della sorgente luminosa, influenza il suo stato termico e quindi il flusso luminoso emesso dalla lampada;
- i moti d'aria presenti nel laboratorio possono essere provocati dal sistema di condizionamento, dalla rotazione degli assi del goniometro, e dai moti convettivi generati dal calore della sorgente;
- la velocità dell'aria, misurata in prossimità dello stesso punto di misura della temperatura, in condizioni di funzionamento (assi del goniometro in rotazione, lampada accesa, e condizionatori funzionanti) deve essere inferiore a 0,2 m/s;
- l'aria deve essere priva di fumi, polveri, e vapori in grado di attenuare o diffondere la luce che si vuole misurare;
- l'umidità accentua notevolmente il fastidio prodotto dalle polveri presenti, pertanto deve restare compresa tra 45% e 55%.

Distanza di misura:

- Misura la goniometria si basa sulla legge dell'inverso del quadrato della distanza per calcolare l'intensità luminosa attraverso l'illuminamento;
- la sorgente luminosa viene considerata puntiforme alla distanza di misura; in realtà questo non è del tutto corretto, ci sono apparecchi con dimensioni non trascurabili, si rende necessaria una distanza di prova alla quale possiamo considerare ancora puntiforme la sorgente luminosa.

Vale la regola pratica con la quale si determina la minima distanza: data L1 la lunghezza massima e L2 la larghezza massima dell'apparecchio da provare, la minima distanza di prova è uguale alla maggiore tra le seguenti: 5 volte la lunghezza o 15 volte la larghezza (con questo criterio l'intensità luminosa che si va a misurare durante la prova, avrà un errore massimo nell'ordine del 1%)

Alimentazione della sorgente luminosa:

Durante la misurazione, la tensione assunta come riferimento è quella posta ai morsetti dell'alimentazione della sorgente luminosa. Questa tensione deve essere pari alla tensione nominale della lampada o dell'alimentatore.

L'alimentazione deve garantire la stabilità della tensione seguendo per ogni tipo di lampada i valori di stabilizzazione della UNI 10671 e deve essere mantenuta durante tutto lo svolgimento della prova. Di conseguenza la potenza e la corrente devono essere adeguate per il carico da alimentare.

Incertezza:

Le principali fonti di incertezza comuni alle misure fotometriche sono:

- valore assoluto ed instabilità dell'alimentazione elettrica (in particolare variazioni della tensione e della frequenza di alimentazione);
- instabilità della sorgente (in particolare variazioni del flusso emesso durante una accensione e tra accensioni successive);
- disallineamento della sorgente nell'apparecchio rispetto alla condizione prevista;
- deformazioni meccaniche della sorgente durante la misura;
- disallineamento dei componenti ottici dell'apparecchio;
- disallineamento della sorgente rispetto alle condizioni ideali di orientamento nel sistema di misura;
- valore assoluto ed instabilità della temperatura ambiente;
- valutazione e correzione dell'influenza della luce parassita;
- condizioni elettriche e termiche dell'alimentatore;
- influenza degli strumenti di misura dei parametri elettrici;
- influenza della lunghezza dei fili di collegamento e delle capacità parassite;
- velocità dell'aria nei pressi della sorgente;
- polvere nell'ambiente;
- condizioni di pulizia dei componenti ottici dell'apparecchio;
- condizioni di taratura e classe della strumentazione elettrica;
- condizioni di taratura e classe della testa fotometrica.

Capitolo 7

Prove di laboratorio

7.1 Sfera integratrice

Si vedranno nel dettaglio le prove effettuate in sfera integratrice delle stringhe di tipo **a)**, **b)**, **c)** e **d)** descritte nel §3.2:

- a)** Stringa con circuito integrato standard, composta da 5 LED (SMD) LW E67C – OSRAM distanziati 2.5÷10÷10÷10÷2.5cm;
- b)** Stringa con circuito integrato standard, composta da 19 LED (SMD) LW E67C – OSRAM distanziati circa 1cm dalle estremità e circa a 2,4 cm fra loro;
- c)** Stringa con circuito integrato standard, composta da 5 LED (SMD) KWT801-S – SEOUL distanziati 2.5÷10÷10÷10÷2.5cm;
- d)** Stringa con circuito integrato MCPCB, composta da 5 PowerLED X42180 - SEOUL distanziati 2.5÷10÷10÷10÷2.5cm.

Verranno analizzati i report dei risultati prestando attenzione e valutando gli aspetti fotometrici di particolare interesse.

Sono state inserite in sfera le stringhe LED una per volta, iniziando dalla stringa **a)**.

La stringa è stata posizionata al centro della sfera e fissata con una sottile fascetta bianca, la cui incidenza sui risultati della misura della prova effettuata è del tutto irrilevante.

La posizione orizzontatale o verticale del posizionamento è stata dichiarata indifferente successivamente ad una misura di verifica della stringa posta prima in orizzontale poi verticale al centro della sfera. Non essendosi riscontrato alcun cambiamento significativo di risultati del report ($\pm 40\text{mlm}$), se ne è dedotto che il tipo di posizionamento al centro della sfera, ai fini dell'esattezza dei risultati, risulta essere totalmente indifferente.

Per uno svolgimento comodo e rapido delle prove è stato quindi creato un supporto per l'alimentazione delle sorgenti in posizione verticale, cui si necessitava solamente di scollegare lo spinotto di alimentazione delle stringhe e cambiare la stringa stessa, velocizzando, quindi, la procedura di misurazione.

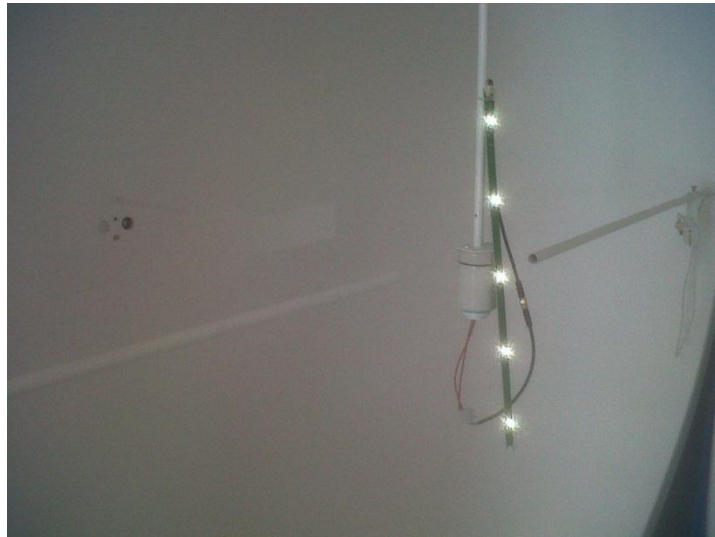


Fig.7.1 - Posizionamento stringa LED in posizione verticale all'interno della sfera goniometrica

7.1.1 Prova a): 5 LED LW E67C – OSRAM

La prova **a)** consiste nella misura della stringa con circuito integrato standard, composta da 5 LED LW E67C – OSRAM distanziati $2.5 \div 10 \div 10 \div 10 \div 2.5$ cm.

Innanzitutto si è impostato al computer i parametri di misura desiderati; la prova è stata eseguita in modalità “esatta” e con un intervallo di misura dello spettro di 5nm sull'intervallo dello spettro visivo 380 ÷ 780nm.

Il tempo di misurazione è variabile; il programma computerizzato prima di effettuare la misurazione aspetta che si sia stabilizzato il flusso (tempo di accomodamento), ossia che la stringa di LED si sia portata alla temperatura di funzionamento. Il principio è analogo all'attesa della fine del transitorio termico. Il tempo massimo prima di effettuare la misura è di 10 minuti; dopodiché passato questo tempo avverrà ugualmente la misurazione dei parametri fotometrici della sorgente.

Prima di questo tempo il programma è impostato in modo tale che, se negli ultimi minuti dopo l'accensione della sorgente non ho una variazione maggiore o minore dell'1% del flusso nominale emesso (indicativo, quindi, che si è il flusso si è stabilizzato e che la stringa LED si è portata alla temperatura di funzionamento), può far partire la misurazione.

Nel caso della prova **a)** si ha una variazione del flusso nel tempo del 0,02% fino ad massimo di 0,05%; la misurazione avviene prima dei 10 minuti limite.

Il report della misura è il seguente:

Product Remark

| | | |
|--------------|----------------|-----------------|
| Type: Test | NO.: 134 | Manufacturer: |
| TempI: 24.3C | TempX: 24.2C | Humidity: % |
| Operator: | Time: 11:49:45 | Date: 2012-6-27 |

CIE Color Parameter

Chromaticity Coordinate: $x=0.3155$ $y=0.3144$ $u'=0.2055$ $v'=0.4607$ $duv=-0.0060$
CCT: $T_c=6459K$ Dominant wave: 476.8nm Purity: 7.9%
PeakW.: 456nm HalfW.: 30.2nm RatioR=14.0% G=80.7% B=5.3%

Rending Index:

Ra= 73.3 Ra'= 63.6
R1 =71 R2 =87 R3 =88 R4 =62 R5 =69 R6 =73 R7 =81
R8 =57 R9 =-23 R10=61 R11=52 R12=39 R13=76 R14=93

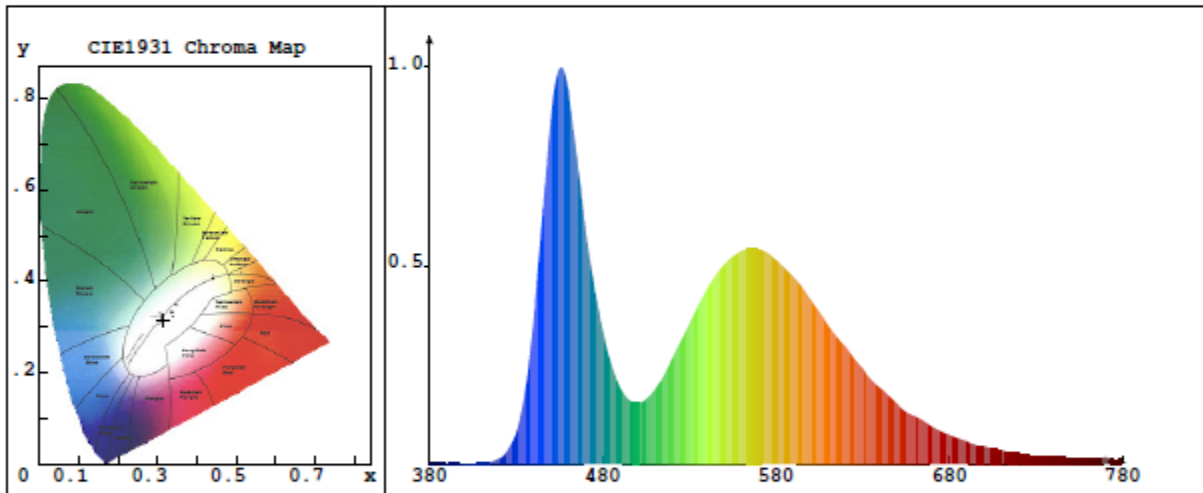


Photo Parameter

Flux: 10.6 lm Effice: 15.2lm/W Lumi.Pow: 32.6mW

Electrical Parameter

Voltage: 24.0V Current: 0.030A Power: 0.70W PF: 1.000

Instrument Status

| | | |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Instrument: HopooHSP6000 | Lamp: A2856K/794.5lm | Scan Range: 380nm-780nm |
| TestModel: Exact | Interval: 5nm | PMT Temp: 28.0C |
| Main: 7 | Id: 17 | Ip: 39618 |
| Reference: 4 | REF: 8012 | Undulation: 0.087% |

In prima analisi si nota che lo spetto di emissione rispecchia il tipico andamento spettrale di un LED; ciò si denota dal tipo di sinuosità della curva e dalla posizione dei due massimi presenti. Come si può anche vedere, in dettaglio dai parametri di colore CIE, si ha un'alta temperatura di colore $T_c=6459K$, corrispondente ad una luce "fredda" e quindi un picco dell'onda a 456nm. Le coordinate cromatiche x e y, identificabili anche nel diagramma Lxy, sono pari a:

- $x=0,3155$
- $y=0,3144$

Il valore dell'indice di resa cromatica Ra (relativo solo agli 8 indici generali di colorazione poco intensa) è uguale a 73,3, corrispondente ad un buon valore (Ra massimo uguale a 100, riferimento ad una lampada ad incandescenza).

Il valore esteso dell'indice di resa cromatica corrisponde alla colorazione completa CRI Ra', eguale al valore 63,6, comprensiva degli 8 indici generali di colorazione poco intensa e dei 6 indici speciali di colorazione satura:

$$R_a' = 100 - 4,6(\Delta E)_i$$

Questo secondo parametro risulta minore del precedente poiché essendo Ra' un valore completo, che tiene conto dei 14 indici di colore, comprende anche l'indice di riferimento al colore speciale R9, molto più basso rispetto agli altri indici. Il risultato è quindi un abbassamento del valore complessivo dell'indice di resa cromatica Ra' (vedi §2.6.3).

Quest'aspetto sarà una caratteristica frequentemente riscontrata nei LED presi in considerazione; si noterà infatti, anche nei successivi report, un valore basso dell'indice R9 (seguito normalmente anche dell'indice R12).

Come parametri fotometrici ci concentriamo sul flusso nominale emesso e sull'efficienza luminosa:

- il flusso luminoso emesso $\Phi=10,6$ lm è alquanto basso, ci si aspettava un flusso più consistente;
- l'efficienza luminosa $\eta=15,2$ lm/W non è alta.

Si deduce che la stringa formata da 5 LED, o meglio, il LED LW E67C – OSRAM non è molto performante.

I parametri elettrici non fanno altro che confermare ciò che già si poteva prevedere dalle schede tecniche dei LED in uso:

- la tensione applicata alla stringa è pari a 24V;
- la corrente circolante nel sistema completo è pari a 30mA;
- la potenza 0,70W eguale alla potenza nominale di un singolo LED (135mW) moltiplicata per i 5 LED di una stringa, più eventuali perdite nei componenti elettronici della stringa;
- il fattore di potenza ovviamente, trattandosi di grandezze in continua, risulta uguale a 1.

Notiamo che, trattandosi di potenze molto basse, si avrà un transitorio esiguo e un riscaldamento a regime della stringa LED trascurabile.

Anche osservando la struttura dell'apparecchio illuminante, si può ritenere facilmente dissipabile il (poco) calore sviluppato:

- PMT Temp=28°C: corrisponde alla misura di temperatura sul punto installato;
- Temp I=24,3°C: temperatura interna alla sfera in generale;
- Temp X=24,2°C: temperatura dell'ambiente esterno alla sfera.

7.1.2 Prova b): 19 LED LW E67C - OSRAM

Stringa con circuito integrato standard, composta da 19 LED LW E67C – OSRAM distanziati circa 1cm dalle estremità e circa 2,4 cm fra loro.

Product Remark

| | | |
|--------------|----------------|-----------------|
| Type: Test | NO.: 142 | Manufacturer: |
| TempI: 24.7C | TempX: 24.7C | Humidity: % |
| Operator: | Time: 10:46:58 | Date: 2012-6-28 |

CIE Color Parameter

Chromaticity Coordinate: $x=0.3114$ $y=0.2882$ $u'=0.2135$ $v'=0.4445$ $duv=-0.0187$
 CCT: $T_c=7065K$ Dominant wave: 381.1nm Purity: 13.7%
 PeakW.: 450nm HalfW.: 25.4nm RatioR=16.2% G=79.5% B=4.2%

Rending Index: Ra= 81.3 Ra'= 75.8

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R1 =85 | R2 =84 | R3 =74 | R4 =85 | R5 =83 | R6 =71 | R7 =86 |
| R8 =83 | R9 =46 | R10=54 | R11=80 | R12=47 | R13=84 | R14=84 |

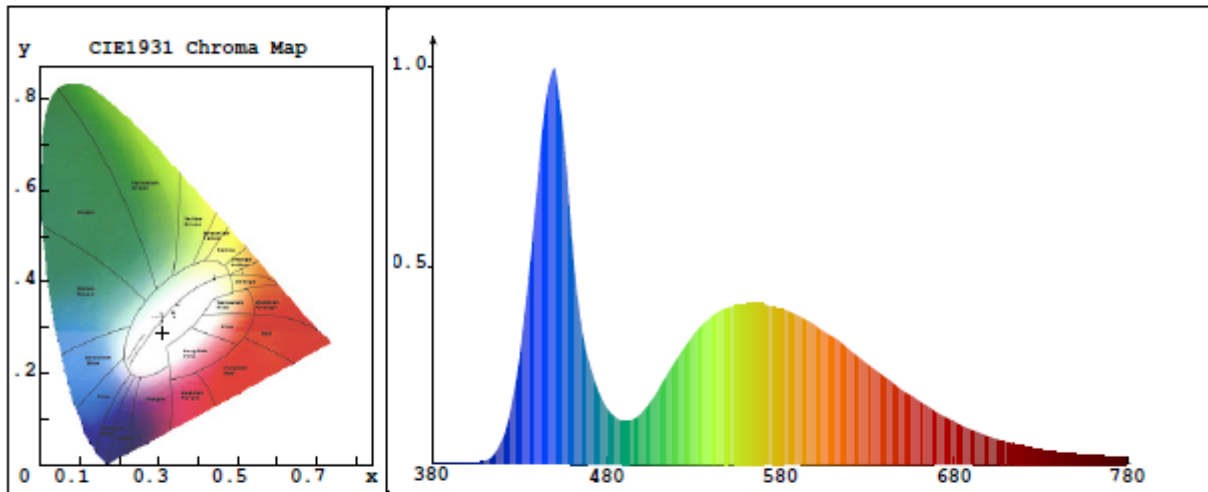


Photo Parameter

Flux: 29.1 lm Effice: 10.8lm/W Lumi.Pow: 103.6mW

Electrical Parameter

Voltage: 23.9V Current: 0.112A Power: 2.70W PF: 1.000

Instrument Status

| | | |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Instrument: HopooHSP6000 | Lamp: A2856K/794.5lm | Scan Range: 380nm-780nm |
| TestModel: Exact | Interval: 5nm | PMT Temp: 25.9C |
| Main: 6 | Id: 9 | Ip: 32714 |
| Reference: 4 | REF: 21933 | Undulation: -0.141% |

Rispetto al caso a) non è stato fatto altro che aggiungere altri LED della stessa tipologia; si vede subito che la curva dello spettro di emissione mantiene la forma della precedente. A differenza si ha una temperatura di colore maggiore $T_c=7065K$ (più “fredda”) ed un picco dell’onda che si mantiene sui 450nm.

Essendo stato aumentato il numero di LED per stringa è aumentato sensibilmente anche l'indice di resa cromatica Ra' e l'indice Ra. Come accennato i valori degli indici speciali R9 e R12 sono minori (di poco) rispetto alla media degli altri indici di colore generale e speciale.

Come parametri fotometrici:

- il flusso luminoso emesso $\Phi=29,1$ lm è un valore abbastanza elevato, soprattutto in riferimento al caso a);
- l'efficienza luminosa $\eta= 10,8$ lm/W cala;

Se ne deduce che la stringa formata da 19 LED LW E67C – OSRAM non è performante, poiché pur avendo un flusso maggiore del caso precedente ha un efficienza luminosa molto bassa e notevolmente sotto le aspettative.

Per i parametri elettrici si ha:

- la tensione applicata alla stringa è pari a 23,9V;
- la corrente circolante nel sistema completo è pari a 112mA;
- la potenza 2,70W eguale alla potenza nominale di un singolo LED (135mW) moltiplicata per i 19 LED di una stringa (eccetto qualche perdita nei componenti elettronici presenti sulla stringa);
- il fattore di potenza uguale a 1.

La potenza in questa stringa di LED risulta essere maggiore rispetto al caso precedente (si hanno molti più LED).

È presente un transitorio termico più prolungato prima della partenza della misurazione (tempo di accomodamento maggiore), il calore sviluppato a regime dalla stringa si può misurare tramite il parametro PMT Temp; risultando trascurabile ai fini della compromissione dei materiali, quindi del buon funzionamento.

- PMT Temp=25,9°C;
- Temp I=24,7°C;
- Temp X=24,7°C.

7.1.3 Prova c): 5 LED KWT801-S - SEOUL

Stringa con circuito integrato standard, composta da 5 LED KWT801-S – SEOUL distanziati 2.5÷10÷10÷10÷2.5cm.

Product Remark

| | | |
|--------------|----------------|-----------------|
| Type: Test | NO.: 129 | Manufacturer: |
| TempI: 24.3C | TempX: 24.3C | Humidity: % |
| Operator: | Time: 11:01:02 | Date: 2012-6-27 |

CIE Color Parameter

Chromaticity Coordinate: x=0.3054 y=0.3017 u'=0.2033 v'=0.4518 duv=-0.0075
 CCT: Tc= 7295K Dominant wave: 475.3nm Purity: 12.6%
 PeakW.: 455nm HalfW.: 25.0nm RatioR=13.4% G=81.0% B=5.6%

Rending Index: Ra= 72.5 Ra'= 62.5

| | | | | | | |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R1 =71 | R2 =86 | R3 =85 | R4 =61 | R5 =67 | R6 =70 | R7 =81 |
| R8 =59 | R9 =-21 | R10=57 | R11=50 | R12=33 | R13=76 | R14=92 |

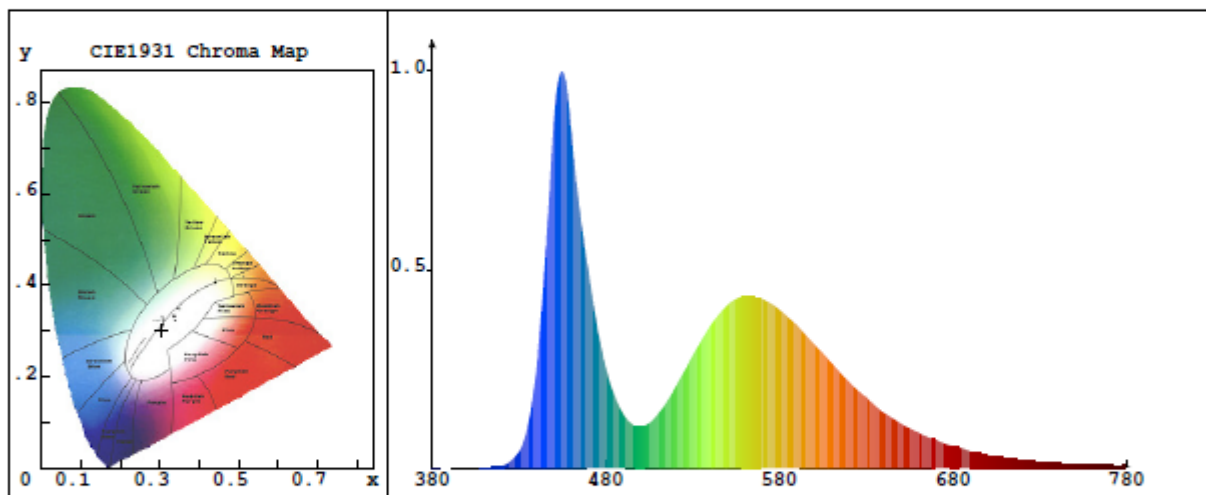


Photo Parameter

Flux: 23.9 lm Effice: 47.8lm/W Lumi.Pow: 75.6mW

Electrical Parameter

Voltage: 24.2V Current: 0.021A Power: 0.50W PF: 1.000

Instrument Status

| | | |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Instrument: HopooHSP6000 | Lamp: A2856K/794.51m | Scan Range: 380nm-780nm |
| TestModel: Exact | Interval: 5nm | PMT Temp: 27.0C |
| Main: 6 | Id: 16 | Ip: 27894 |
| Reference: 4 | REF: 17974 | Undulation: 0.033% |

2

Anche in questo caso lo spettro di emissione mantiene la sua forma caratteristica dello spettro LED. Il report indica che si ha una temperatura di colore elevata Tc=7295K ed un picco d'onda sui 455nm.

Essendo cambiato il tipo di LED sulla stringa è cambiato l'indice di resa cromatica Ra' e l'indice Ra; essi si mantengono comunque a valori discreti.

I valori degli indici speciali R9 e R12 sono minori rispetto alla media degli altri indici di colore generale e speciale.

Come parametri fotometrici si ha:

- il flusso luminoso emesso $\Phi=23,9$ lm è un valore abbastanza elevato;
- l'efficienza luminosa $\eta=47,8$ lm/W è elevata, buona per un LED dedicato all'illuminazione.

Per i parametri elettrici si ha:

- la tensione applicata alla stringa è pari a 24,2V;
- la corrente circolante nel sistema completo è pari a 21mA;
- la potenza 0,5W, eguale alla potenza di utilizzo di un singolo LED (100mW) moltiplicata per i 5 LED di una stringa;
- il fattore di potenza uguale a 1.

Nel complesso il LED KWT801-S – SEOUL è un LED performante; ha un flusso luminoso elevato ed una buona efficienza.

Questa stringa LED è studiata per funzionare ad una potenza minore di quella massima. Per fare ciò la resistenza elettrica presente sul circuito stampato e i LED fanno circolare sulla singola stringa una corrente di 21mA con l'applicazione ai capi (della stringa) di 24Vd.c.

Questo corrisponde ad avere una potenza di:

$$P = V \cdot I = 24,2 \cdot 0,021 = 0,5082W$$

È presente un transitorio termico ininfluyente; l'aumento di temperature riscontrato risulta trascurabile ai fini della compromissione dei materiali, del buon funzionamento e delle caratteristiche ottiche/elettriche.

Parametri termici a regime:

- PMT Temp=26,8°C;
- Temp I=24,3°C;
- Temp X=24,4°C.

7.1.4 Prova d): 5 PowerLED X42180 - SEOUL

Stringa con circuito stampato MCPCB, composta da 5 PowerLED X42180 - SEOUL distanziati 2.5÷10÷10÷10÷10÷2.5cm.

Product Remark

| | | |
|--------------|----------------|-----------------|
| Type: Test | NO.: 131 | Manufacturer: |
| TempI: 24.3C | TempX: 24.1C | Humidity: % |
| Operator: | Time: 11:12:25 | Date: 2012-6-27 |

CIE Color Parameter

Chromaticity Coordinate: x=0.3581 y=0.3518 u'=0.2202 v'=0.4867 duv=-0.0049
 CCT: Tc= 4522K Dominant wave: 582.8nm Purity: 13.0%
 PeakW.: 455nm HalfW.: 27.9nm RatioR=21.1% G=75.0% B=3.9%

Rending Index: Ra= 95.8 Ra'= 93.7

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R1 =97 | R2 =98 | R3 =95 | R4 =98 | R5 =96 | R6 =94 | R7 =96 |
| R8 =95 | R9 =89 | R10=96 | R11=97 | R12=67 | R13=97 | R14=96 |

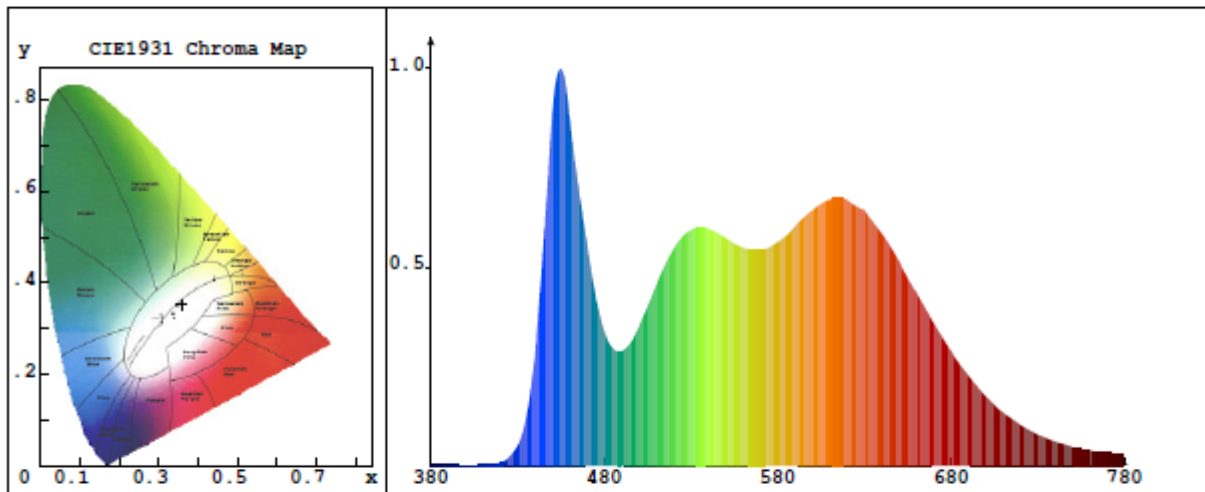


Photo Parameter

Flux: 177.5 lm Efficace: 44.4lm/W Lumi.Pow: 596.2mW

Electrical Parameter

Voltage: 24.0V Current: 0.166A Power: 4.00W PF: 1.000

Instrument Status

| | | |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Instrument: HopooHSP6000 | Lamp: A2856K/794.5lm | Scan Range: 380nm-780nm |
| TestModel: Exact | Interval: 5nm | PMT Temp: 27.4C |
| Main: 5 | Id: 8 | Ip: 30880 |
| Reference: 3 | REF: 13204 | Undulation: -0.015% |

La curva dello spettro di emissione di questa stringa di PowerLED X42180 – SEOUL è diversa dalle curve viste finora; a parte il picco, posto sempre a 455nm, ha due nuovi “dossi” in prossimità dei 530nm e 600nm; questo fa sì che la sua temperatura di colore sia più bassa, Tc=4522K, pari ad una sensazione di colore più “calda”.

Un altro cambiamento importante risiede nel fatto che l’indice di resa cromatica Ra’ e l’indice Ra siano pressoché pari ai valori massimi, ottenendo quindi una ottima percezione del colore. I valori

degli indici speciali R9 e R12, infatti, si integrano quasi perfettamente alla media dei valori degli altri indici di colore generale e speciale.

Come parametri fotometrici si ha:

- il flusso luminoso emesso $\Phi=177,5\text{lm}$ è un valore elevato;
- l'efficienza luminosa $\eta=44,4\text{lm/W}$ è elevata.

Per i parametri elettrici si ha:

- la tensione applicata alla stringa è pari a 24V;
- la corrente circolante nel sistema completo è pari a 166mA;
- la potenza 4W ($=0,8*5\text{LED}$);
- il fattore di potenza uguale a 1.

I parametri termici a regime:

- PMT Temp= $27,4^{\circ}\text{C}$;
- Temp I= $24,3^{\circ}\text{C}$;
- Temp X= $24,1^{\circ}\text{C}$.

Notiamo come i parametri termici si mantengano a valori comparabili con quelli dei LED precedentemente visti pur lavorando a potenza molto maggiori. Questo è giustificabile dall'utilizzo di un sistema di dissipazione del calore (piastrina metallica interna al package e stringa di circuito stampato MCPCB).

Nel complesso il PowerLED è molto performante. Tuttavia si reputa che alcune caratteristiche fotometriche siano troppo spinte per l'applicazione in galleria di questo tipo di sorgente: la temperatura di colore relativamente bassa e l'indice Ra' vicina al valore massimo ($Ra'=100$) sono caratteristiche superflue nel caso in esame, che tenderebbero più ad indirizzare questo tipo di LED ad un uso domestico.

Il PowerLED X42180 – SEOUL raggiunge infatti un prezzo decuplicato rispetto agli altri LED visti finora. Questo aspetto, sommato all'elevato assorbimento di potenza della singola stringa, porta definitivamente ad escludere questa tipologia di LED per l'applicazione in studio; per una galleria lunga si avrebbe, infatti, una maggiorazione di costi (di materiale e di consumo elettrico) tutt'altro che irrilevante.

Con l'applicazione alle stringhe LED dell'ottica in plexi (PMMA), necessaria per una protezione da agenti atmosferici esterni, nonché utile per un efficace apertura del flusso luminoso, è stato riscontrato in sfera integratrice un generale:

- Aumento della temperatura di colore; quindi uno spostamento dello spettro d'emissione verso la tonalità rossa;
- Una diminuzione, benché minima, del flusso luminoso e quindi dell'efficienza luminosa; ciò è dovuto alla non perfetta trasparenza del materiale plastico PMMA.

Il flusso, e l'efficienza di pari passo, sono destinate a diminuire ancora con l'inserimento della stringa, comprensiva di ottica plexi, nella struttura inox tubolare dell'apparecchio illuminante. Questo perché, ragionevolmente, una parte di flusso si perderà all'interno del tubo non fornendo contributo all'illuminazione utile.

Poiché si inizia a considerare l'idea di un utilizzo futuro del LED KWT801-S – SEOUL nel campo dell'illuminazione di emergenza della galleria in esame; è interessante verificare altri campioni di questa tipologia di stringa **c)** per comprovarne l'efficienza.

Si puntualizza che, per una corretta e oggettiva valutazione, verranno portate avanti nel corso dello studio anche le tipologie di stringhe **a)** e **b)**, senza però soffermarsi sui report ottenuti.

Si sono prese dal laboratorio due nuove stringhe appena assemblate della tipologia **c)**, **c₁)** e **c₂)**, che montano anch'esse 5 LED KWT801-S – SEOUL.

7.1.5 Prova c₁): 5 LED KWT801-S - SEOUL

Product Remark

| | | |
|--------------|----------------|-----------------|
| Type: Test | NO.: 140 | Manufacturer: |
| TempI: 24.6C | TempX: 24.6C | Humidity: % |
| Operator: | Time: 10:38:07 | Date: 2012-6-28 |

CIE Color Parameter

Chromaticity Coordinate: $x=0.3088$ $y=0.3014$ $u'=0.2059$ $v'=0.4522$ $duv=-0.0096$
 CCT: Tc= 7052K Dominant wave: 471.4nm Purity: 11.7%
 PeakW.: 455nm HalfW.: 23.4nm RatioR=13.8% G=80.8% B=5.5%

Rending Index: Ra= 72.7 Ra'= 62.9

| | | | | | | |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R1 =71 | R2 =86 | R3 =85 | R4 =61 | R5 =68 | R6 =70 | R7 =81 |
| R8 =60 | R9 =-17 | R10=57 | R11=50 | R12=33 | R13=77 | R14=91 |

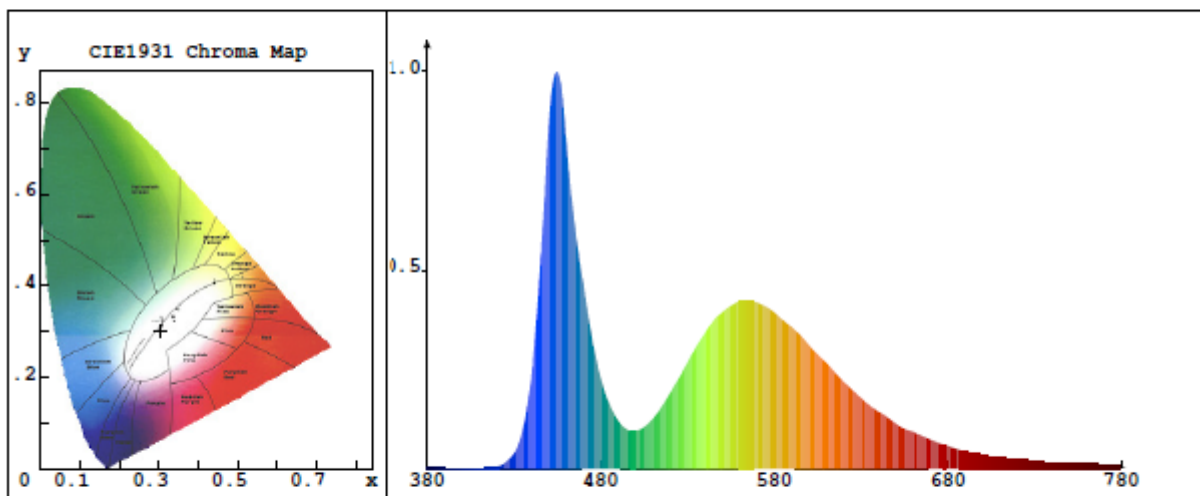


Photo Parameter

Flux: 22.8 lm Effice: 45.5lm/W Lumi.Pow: 74.3mW

Electrical Parameter

Voltage: 24.0V Current: 0.021A Power: 0.50W PF: 1.000

Instrument Status

| | | |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Instrument: HopooHSP6000 | Lamp: A2856K/794.51m | Scan Range: 380nm-780nm |
| TestModel: Exact | Interval: 5nm | PMT Temp: 24.9C |
| Main: 6 | Id: 7 | Ip: 28077 |
| Reference: 4 | REF: 19561 | Undulation: 0.158% |

Notiamo che la nuova stringa c₁) si differenzia in vari parametri dalla stringa c) di eguali caratteristiche.

La temperatura di colore varia, Tc=7052K (contro Tc=7295K), il picco d'onda invece rimane fisso sui 455nm.

L'indice di resa cromatica Ra' e l'indice Ra rimangono pressoché invariati.

Come parametri fotometrici si hanno le differenze di:

- flusso luminoso emesso $\Phi=22,8$ lm (contro $\Phi=23,9$ lm);
- efficienza luminosa $\eta=45,5$ lm/W (contro $\eta=47,8$ lm/W).

Per i parametri elettrici non si hanno scostamenti.

A differenza del caso c) la stringa LED sembra scaldare meno, considerando i parametri termici si trova:

- PMT Temp=24,9°C (contro 26,8°C);
- Temp I=24,6°C (contro 24,3°C);
- Temp X=24,6°C (contro 24,4°C).

7.1.6 Prova c₂): 5 LED KWT801-S - SEOUL

Product Remark

| | | |
|--------------|----------------|-----------------|
| Type: Test | NO.: 141 | Manufacturer: |
| TempI: 24.6C | TempX: 24.6C | Humidity: % |
| Operator: | Time: 10:42:04 | Date: 2012-6-28 |

CIE Color Parameter

| | | |
|--|------------------------|-----------------------------|
| Chromaticity Coordinate: x=0.3041 y=0.2999 u'=0.2030 v'=0.4506 duv=-0.0077 | | |
| CCT: Tc= 7429K | Dominant wave: 475.3nm | Purity: 13.2% |
| PeakW.: 455nm | HalfW.: 24.2nm | RatioR=13.2% G=81.1% B=5.6% |

Rending Index: Ra= 72.3 Ra'= 62.2

| | | | | | | |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R1 =71 | R2 =85 | R3 =84 | R4 =61 | R5 =67 | R6 =70 | R7 =81 |
| R8 =59 | R9 =-22 | R10=56 | R11=50 | R12=32 | R13=76 | R14=91 |

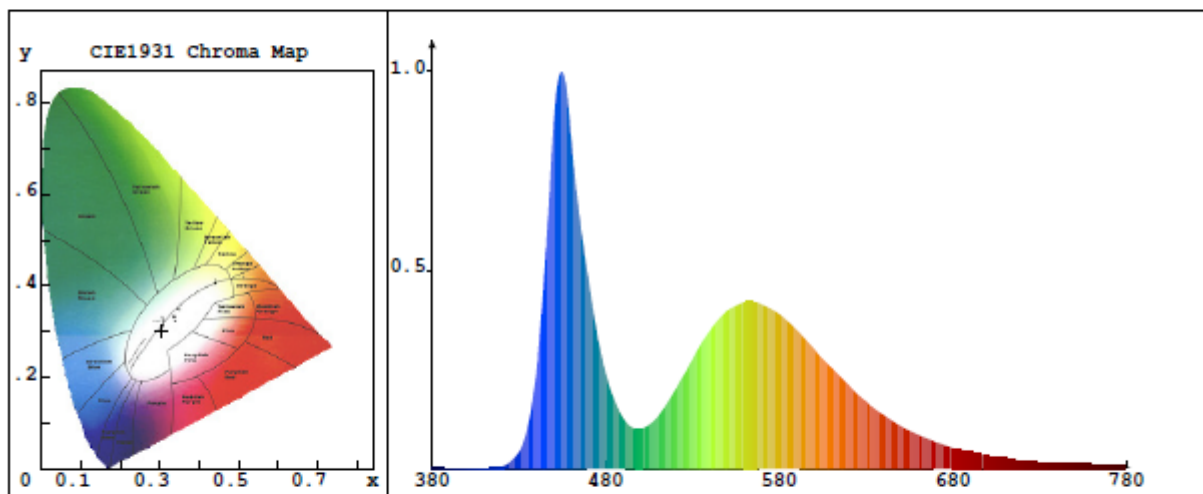


Photo Parameter

| | | |
|---------------|------------------|------------------|
| Flux: 26.0 lm | Effice: 52.0lm/W | Lumi.Pow: 84.8mW |
|---------------|------------------|------------------|

Electrical Parameter

| | | | |
|----------------|-----------------|--------------|-----------|
| Voltage: 24.0V | Current: 0.021A | Power: 0.50W | PF: 1.000 |
|----------------|-----------------|--------------|-----------|

Instrument Status

| | | |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Instrument: HopooHSP6000 | Lamp: A2856K/794.5lm | Scan Range: 380nm-780nm |
| TestModel: Exact | Interval: 5nm | PMT Temp: 25.3C |
| Main: 6 | Id: 9 | Ip: 32013 |
| Reference: 4 | REF: 19561 | Undulation: 0.010% |

La seconda nuova stringa **c₂**) si differenzia anch'essa in vari parametri dalla stringa **c)** e **c₁**) di eguali caratteristiche.

La temperatura di colore varia, $T_c=7429K$ (contro $T_c=7295K$ di **c)** e contro $T_c=7052K$ di **c₁**)), il picco d'onda invece rimane sempre fisso sui 455nm.

L'indice di resa cromatica R_a' e l'indice R_a rimangono pressoché invariati.

Come parametri fotometrici si hanno le differenze di:

- Flusso luminoso emesso $\Phi=26$ lm (contro $\Phi=23,9$ lm di **c)** e contro $\Phi=22,8$ lm di **c₁**));
- efficienza luminosa $\eta=52$ lm/W (contro $\eta=47,8$ lm/W di **c)** e contro $\eta=45,5$ lm/W di **c₁**)).

Per i parametri elettrici non emergono scostamenti.

A differenza del caso **c)** e **c₁**) considerando i parametri termici si trovano:

- PMT Temp= $25,3^\circ C$ (contro $26,8^\circ C$ di **c)** e contro $24,9^\circ C$ di **c₁**));
- Temp I= $24,6^\circ C$ (contro $24,3^\circ C$ di **c)**);
- Temp X= $24,6^\circ C$ (contro $24,4^\circ C$ di **c)**).

Queste differenze tra stringhe di caratteristiche eguali, seppur minime, possono risultare inizialmente strane e difficili da giustificare in quanto le stringhe erano composte da componenti esattamente identici.

La motivazione sta nella natura della sorgenti LED: come già precisato nel §2.7 *punto 1*, essendo i LED componenti elettronici, anche se appartengono allo stesso modello/casa produttrice/anno produzione/stabilimento di produzione, essi sono soggetti a micro imperfezioni e a imprecisioni.

Queste imprecisioni che portano, come si è notato, a variazioni della temperatura di colore, del flusso luminoso e quindi dell'efficienza, sono comunque di grandezza trascurabile; complessivamente, in un installazione illuminotecnica, si possono ritenere non apprezzabili a livello visivo.

7.2 Goniometro

Come accennato, per comodità e soprattutto per esigenze pratiche di misurazione, si considererà 1m di apparecchio illuminante anziché 2m. Tale metro di apparecchio illuminante contiene al suo interno la sezione in plexi (PMMA) che racchiude le due stringhe LED scelte.

Le prove sono state quindi eseguite per due stringhe collegate in successione all'interno di 1m di apparecchio illuminante completo di ottica.

Questa conformazione di apparecchio illuminante è considerato come un "prototipo", essendo di fatto un apparecchio di prova creato per scopi dimostrativi e sperimentali.

Le stringhe del prototipo di apparecchio illuminante saranno della tipologia:

- **a')**: 2 stringhe da 5 LED LW E67C – OSRAM, per un totale di 10 LED; le caratteristiche fotometriche delle due stringhe, sebbene uguali, si differenziano in maniera trascurabile.
- **b')**: 2 stringhe da 19 LED LW E67C – OSRAM, per un totale di 38 LED; le caratteristiche fotometriche delle due stringhe, sebbene uguali, si differenziano in maniera trascurabile.
- **c')**: 2 stringhe (per l'esattezza c_1 e c_2) composte da 5 LED KWT801-S – SEOUL ciascuna, per un totale di 10 LED; le caratteristiche fotometriche delle due stringhe c_1 e c_2 si differenziano in maniera trascurabile, come visto nel §7.1.5 e §7.1.6.

In aggiunta verrà testata anche una quarta tipologia **d')**: consistente nella misura delle stringhe c_1 e c_2) con l'applicazione di una lente ottica in plastica posta su ogni LED.

Lo scopo è analizzare il comportamento del solido fotometrico con e senza l'applicazione di una lente ottica secondaria che concentra il fascio luminoso (rispettivamente prova **d')** e prova **c')**).

- **d')**: 2 stringhe (esattamente c_1 e c_2) composte da 5 LED KWT801-S – SEOUL ciascuna, per un totale di 10 LED ognuno con una lente ottica secondaria applicata.

Nota: come si è detto, le caratteristiche ottiche tra due stringhe possono differenziarsi; in questi casi, per due stringhe date, per avere un unico valore di un parametro fotometrico è stata fatta la media del valore di ogni stringa.

Ad esempio: il flusso di c_1) è uguale a $\Phi=22,8$ lm, il flusso di c_2) uguale a $\Phi=26$ lm; il flusso che verrà preso in considerazione per questo tipo di stringa sarà considerato pari alla media fra i due (24,4lm).

Se si considera 1m di apparecchio illuminante il suo corrispettivo flusso equivale o al flusso medio moltiplicato per due ($2 \cdot 24,4\text{lm} = 48,8\text{lm}$) o, analogamente, alla somma dei flussi dei due moduli da esso contenuti, in questo caso: $\Phi_{\text{tot}} = 22,8\text{lm} + 26\text{lm} = 48,8\text{lm} \sim 49\text{lm}$.

7.2.1 Impostazione modalità di misura e settaggi

La prima prova è stata eseguita con il metodo C- γ , apparentemente, indicato per apparecchi illuminanti di tipo tubolare (vedi §6.3, Fig.6.10).

Non esistendo un supporto adatto per il tipo di apparecchio illuminante in studio, ci si è ingegnati per fissarlo saldamente al braccio centrale del goniometro e posizionarlo il più precisamente centrato e in bolla orizzontalmente.



Fig.7.2 - Posizionamento apparecchio metodo C- γ

Dalla postazione di controllo è stata avviata la procedura di misurazione del solido fotometrico dell'apparecchio illuminante, avendo preventivamente impostato i parametri di rotazione e i settaggi indicati. Si imposta una velocità di rotazione del macchinario goniometrico, un intervallo di frequenza di scansione delle sezioni di piano C e un range di misurazione di C; analogamente un intervallo di frequenza di scansione, su ogni singolo piano C, dell'angolo γ e un range di misurazione di γ (vedi Fig.6.10 §6.3 per comprendere i piani C e l'angolo γ).

Velocità di rotazione : 5°/s

C interval = 10°: angolo di spostamento scansione sezione di piano C;

C range = 0° ÷ 180°: range delle misurazioni delle sezioni di piano C;

γ interval = 5°: angolo γ di spostamento scansione su ogni singola sezione di piano C (5°:poco fitta);

γ range = 0° ÷ 120°: range di misura γ .

Dal report elaborato dalla misurazione, però, risulta evidente una mancanza di precisione: la curva nel diagramma polare risulta troppo frastagliata e asimmetrica in tutte le sue sezioni di piano.

L'indicazione di una misura mal eseguita ci viene fornita anche dal fatto che nel diagramma cartesiano le curve (andamento dell'intensità luminosa [cd] su varie sezioni di piano) non risultano combaciare nel punto zero.

Si effettua, quindi, una misura con una precisione maggiore per tentare di migliorarla rispetto alla precedente.

Velocità di rotazione : 3°/s

C interval = 10°;

C range = 0° ÷ 360°;

γ interval = 1°;

γ range = 0° ÷ 120°

Anche dai risultati emersi da questa seconda misura è evidente una mancanza di precisione.

Si ipotizza quindi che il metodo C- γ non sia quello più adeguato per questo tipo di apparecchio stretto e lungo.

Disponendo infatti di un solo braccio centrale e avendo fissato "artigianalmente" a questo l'apparecchio illuminante, è possibile che durante la movimentazione del goniofotometro questo sia stato sottoposto a vibrazioni, oscillazioni e sollecitazioni che abbiano impedito una misura precisa e quindi affidabile da parte del detector device.

Si cambierà quindi la struttura, passando dal metodo C- γ a B- β .

Il posizionamento attraverso il metodo B- β avviene applicando un secondo braccio e collocando fissamente, fra le due braccia, l'apparecchio in modo perfettamente orizzontale.



Fig.7.3 - Posizionamento apparecchio metodo B- β

Eseguiamo dapprima una misura rapida per verificare la bontà dei risultati.

Velocità di rotazione : 3°/s

B interval = 20°: angolo di spostamento scansione sezione di piano B;

B range = -90° ÷ 90°: range delle misurazioni delle sezioni di piano B;

β interval = 5°: angolo β di spostamento scansione su ogni singola sezione di piano B (5°:poco fitta);

β range = -90° ÷ 90°: range di misura β .

(vedi *Fig.6.10* §6.3 per comprendere i piani B e l'angolo β).

Le curve sembrano corrispondere alle aspettative; nel punto 0 del diagramma cartesiano le curve si incrociano e combaciano tutte perfettamente, pur mantenendo una leggera asimmetria (più o meno marcata in relazione del tipo sezione di piano fotometrico misurato).

Tutte le seguenti schede di report saranno state elaborate avendo impostato i seguenti settaggi:

Velocità di rotazione : 3°/s

B interval = 5°

B range = -90° ÷ 90°;

β interval = 1°;

β range = -90° ÷ 90°.

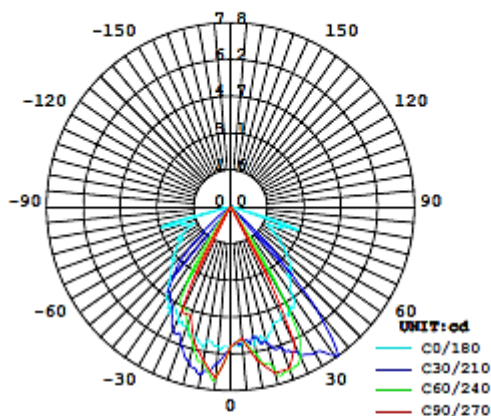
Rispetto a quelli precedenti sono stati diminuiti i parametri B interval e β interval, avendo una misura il più possibile precisa e affidabile.

7.2.2 Prova a'): apparecchio illuminante 10 LED - OSRAM

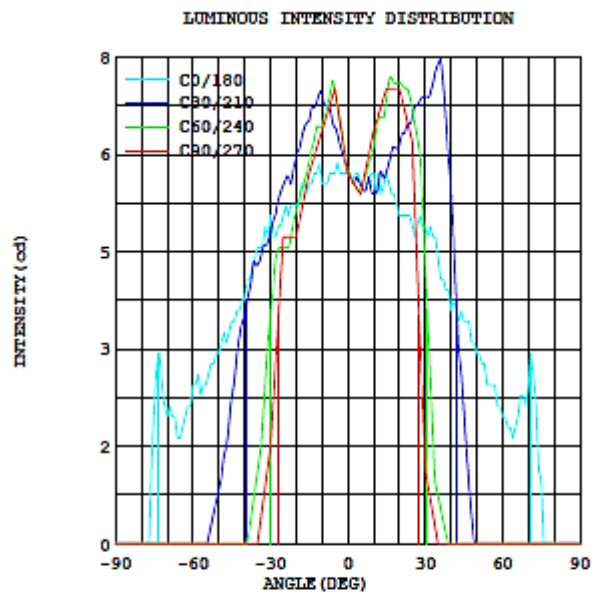
Prova di 1m di apparecchio illuminante completo, di tipologia a'): 2 stringhe (di tipo a)) da 5 LED LW E67C – OSRAM, per un totale di 10 LED.

| TEST DATA: | | | | | |
|--------------------|---------|------------------------|----------|--------------------|--|
| MODEL: | LW E67C | I _{max} (cd): | 7.791 | η street_up (%): | |
| NOMINAL POWER (W): | 1 | MAXIMUM @ (C,γ): | 210,36.0 | η street_down (%): | |
| RATED VOLTAGE (V): | 24 | TOTAL FLUX (lm): | 9.218 | η house_up (%): | |
| NOMINAL FLUX (lm): | 22.0 | EFFICIENCY (%): | 41.9 | η house_down (%): | |
| TEST FLUX (lm): | 22.00 | η up (%): | | | |
| LAMPS QUANTITY: | 1 | η down (%): | | | |

INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS



INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS



Test:U:24.00V I:0.058A P:1.400W PF:1.000

Test System:LSG-1800
Temperature:25.3DEG
Operators:Vacca Ugo
Test Date:06-27-2012

Test Set: 3.0deg/s B-Beta (TYPE B)
Humidity:65.0%
Test Distance:13.020 m
Remarks: 11

Nella tabella in alto si nota:

- Modello del tipo di LED utilizzato;
- La potenza nominale 1W (approssimata al numero intero senza la virgola). Si ricorda che le due stringhe LED, essendo collegate in parallelo, assorbiranno ciascuna una corrente stabilizzata di ~30mA. Nella parte in basso del report, è indicata la potenza nominale effettiva P=1,4W e relativo cosφ=1;

- Flusso nominale (uguale alla voce “flusso testato”): questo valore 22lm è stato aggiunto manualmente in un secondo momento, poiché si considera un valore corretto di flusso luminoso nominale delle due stringhe di sorgenti LED collegate fra loro, senza l’incasso dell’apparecchio né ottica. Il valore è quindi un valore esatto del flusso nominale [lm] estratto dalla misura precedente effettuata con sfera integratrice.
I 22lm indicati corrispondono infatti a due volte il flusso risultato dalla prova a) uguale a 10,6lm;
- Quantità di lampade: è stata considerata come “lampada” 2 stringhe LED da 45cm.
- I_{MAX} indica il valore massimo di candele emesse dall’apparecchio in una data direzione.
- Il flusso totale indicato (9.218lm) è quello che effettivamente sarà fornito: la differenza fra il flusso totale e il flusso nominale è motivata dal fatto che una parte di flusso nominale si perderà all’interno del tubo facente parte della struttura dell’apparecchio, in direzioni non utili e attraverso l’ottica;
- L’efficienza, infatti, valuta il rendimento dato dal rapporto fra il flusso effettivo (totale) e il flusso nominale dell’apparecchio ($9,218/22=41,9\%$);

Dai grafici disegnati si può vedere il comportamento dell’apparecchio, inclinato e ruotato, fornendo quindi varie sezioni di piano di misura:

- C0/180
- C30/210
- C60/240
- C90/270

I grafici quindi, esprimono le curve del solido fotometrico, di estremo interesse per conoscere l’intensità luminosa emessa in qualsiasi direzione dall’apparecchio illuminante; esse mettono quindi in relazione, per ogni piano di sezione, l’angolazione [deg°] e l’intensità luminosa [cd].

Si nota che l’intensità luminosa massima di 7,91cd si avrà per una angolazione di 35° sul piano C30/210.

Le due tipologie di rappresentazione differenti si denominano notazione polare (a sinistra) e cartesiana (a destra).

Le curve che interessano maggiormente sono quelle dei casi limite, sezioni del solido fotometrico secondo i due piani longitudinale e trasversale rispetto all’apparecchio:

- C0/180 sezione in senso longitudinale rispetto all’apparecchio.
- C90/270 sezione in senso trasversale rispetto all’apparecchio.

Dall’analisi di queste curve e con l’ausilio della tabelle dettagliata nella pagina seguente, si può notare che l’intensità luminosa sulla sezione C0/180 si distribuisce in maniera abbastanza omogenea e simmetrica, pur mantenendo un aspetto leggermente frastagliato. Si copre un angolo complessivo

pari a circa 140° (come indicato da specifiche tecniche del LED, che assicura un angolo di emissione pari a 120°), arrivando ad un intensità luminosa pari a 4,57cd ad inclinazioni di +35°, 4,74cd ad inclinazioni di -35° dalla normale e raggiungendo valori massimi di circa 6cd sulla normale 0°.

Al contrario sulla sezione C90/270 si ha una distribuzione di intensità meno frastagliata ma composta da una forte componente asimmetrica. Si copre un angolo complessivo dimezzato rispetto a quello della precedente sezione (~70°), arrivando ad un intensità pari a 6,44cd per un angolo di +25° e a 4,916 per un angolo di -25°. Raggiunge il massimo di intensità luminosa pari a 7,289cd per angoli di -5° e +(15°÷20°).

NOTA:

Questa curva fotometrica apparirà specchiata rispetto le curve risultanti dalle tipologie **b')**, **c')** e **d')**; il motivo è semplicemente che nel caso **a')** si è montato al contrario l'apparecchio sul macchinario goniofotometrico.

- Nella parte bassa del report si dispone delle caratteristiche di misurazione quali:
 - il nome nell'apparecchio di misura (LSG-1800);
 - temperatura di lavoro (25,3°C);
 - operatore e data misurazione;
 - settaggio: velocità di rotazione 3,0°/s con metodo B-β;
 - umidità (65%);
 - distanza dal detector device (13,020m).

ZONAL FLUX DIAGRAM

Report number:

| | | |
|---------------------------------------|---------------------|-------------|
| MANUFACTURER: Pro Light | Address: | |
| NAME: a') 10 PowerLED LW E67C – OSRAM | TYPE: Mod.Verde5LED | WEIGHT: |
| SPECIFICATION: | DIMENSION: | SERIAL No.: |

| γ | C0 | C45 | C90 | C135 | C180 | C225 | C270 | C315 | γ | Φ zone | Φ total |
|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 5.0 | 5.933 | 6.975 | 7.289 | 6.893 | 5.763 | 5.749 | 5.594 | 5.719 | 0- 5 | 0.147 | 0.147 |
| 10.0 | 5.763 | 6.994 | 6.611 | 7.003 | 5.933 | 6.144 | 6.611 | 5.929 | 5- 10 | 0.455 | 0.602 |
| 15.0 | 5.763 | 6.421 | 5.933 | 6.523 | 5.933 | 6.696 | 7.289 | 6.775 | 10- 15 | 0.766 | 1.367 |
| 20.0 | 5.424 | 5.840 | 4.916 | 6.290 | 5.255 | 7.362 | 7.289 | 7.062 | 15- 20 | 1.049 | 2.416 |
| 25.0 | 5.255 | 4.975 | 4.916 | 5.181 | 5.085 | 7.289 | 6.441 | 7.230 | 20- 25 | 1.275 | 3.692 |
| 30.0 | 5.255 | 4.508 | 1.525 | 4.643 | 5.085 | 6.785 | 1.186 | 6.413 | 25- 30 | 1.340 | 5.032 |
| 35.0 | 4.746 | 3.395 | 0 | 3.604 | 4.577 | 3.863 | 0 | 3.473 | 30- 35 | 1.115 | 6.148 |
| 40.0 | 3.898 | 1.317 | 0 | 1.312 | 3.729 | 0 | 0 | 0 | 35- 40 | 0.877 | 7.025 |
| 45.0 | 3.559 | 0 | 0 | 0 | 3.559 | 0 | 0 | 0 | 40- 45 | 0.703 | 7.728 |
| 50.0 | 3.051 | 0 | 0 | 0 | 3.051 | 0 | 0 | 0 | 45- 50 | 0.557 | 8.285 |
| 55.0 | 2.542 | 0 | 0 | 0 | 2.542 | 0 | 0 | 0 | 50- 55 | 0.398 | 8.683 |
| 60.0 | 2.542 | 0 | 0 | 0 | 2.034 | 0 | 0 | 0 | 55- 60 | 0.271 | 8.953 |
| 65.0 | 1.695 | 0 | 0 | 0 | 1.864 | 0 | 0 | 0 | 60- 65 | 0.161 | 9.114 |
| 70.0 | 2.034 | 0 | 0 | 0 | 2.542 | 0 | 0 | 0 | 65- 70 | 0.064 | 9.178 |
| 75.0 | 2.203 | 0 | 0 | 0 | 1.017 | 0 | 0 | 0 | 70- 75 | 0.035 | 9.213 |
| 80.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75- 80 | 0.004 | 9.218 |
| 85.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80- 85 | 0 | 9.218 |
| 90.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85- 90 | 0 | 9.218 |
| 95.0 | | | | | | | | | 90- 95 | | |
| 100.0 | | | | | | | | | 95-100 | | |
| 105.0 | | | | | | | | | 100-105 | | |
| 110.0 | | | | | | | | | 105-110 | | |
| 115.0 | | | | | | | | | 110-115 | | |
| 120.0 | | | | | | | | | 115-120 | | |
| 125.0 | | | | | | | | | 120-125 | | |
| 130.0 | | | | | | | | | 125-130 | | |
| 135.0 | | | | | | | | | 130-135 | | |
| 140.0 | | | | | | | | | 135-140 | | |
| 145.0 | | | | | | | | | 140-145 | | |
| 150.0 | | | | | | | | | 145-150 | | |
| 155.0 | | | | | | | | | 150-155 | | |
| 160.0 | | | | | | | | | 155-160 | | |
| 165.0 | | | | | | | | | 160-165 | | |
| 170.0 | | | | | | | | | 165-170 | | |
| 175.0 | | | | | | | | | 170-175 | | |
| 180.0 | | | | | | | | | 175-180 | | |
| DEG | LUMINOUS INTENSITY:cd | | | | | | | | | UNIT:lm | |

Il diagramma di flusso a zone mostra in dettaglio l'intensità di luminosa per le varie sezioni e per i vari angoli di emissione.

Come si può notare il passo è quello impostato da noi, pari a 5°; reputato sufficiente per disegnare un grafico corretto.

Il report segue con grafici e tabelle utili per interpretare il comportamento luminoso dell'apparecchio in studio a'), che tuttavia si ometteranno per snellire l'elaborato:

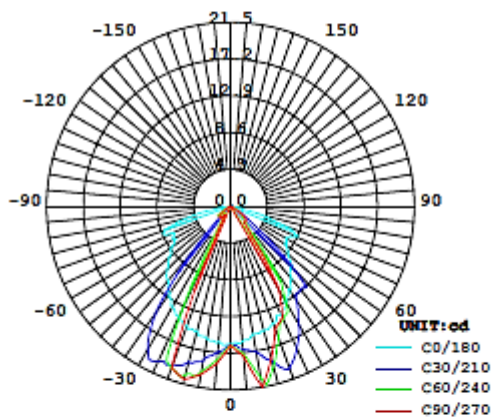
- grafici isocandela;
- grafico isolux;
- tabelle di distribuzione di intensità luminosa.

7.2.3 Prova b'): apparecchio illuminante 36 LED – OSRAM

Prova di 1m di apparecchio illuminante completo, di tipologia b'): 2 stringhe (tipo b)) da 19 LED LW E67C – OSRAM, per un totale di 36 LED.

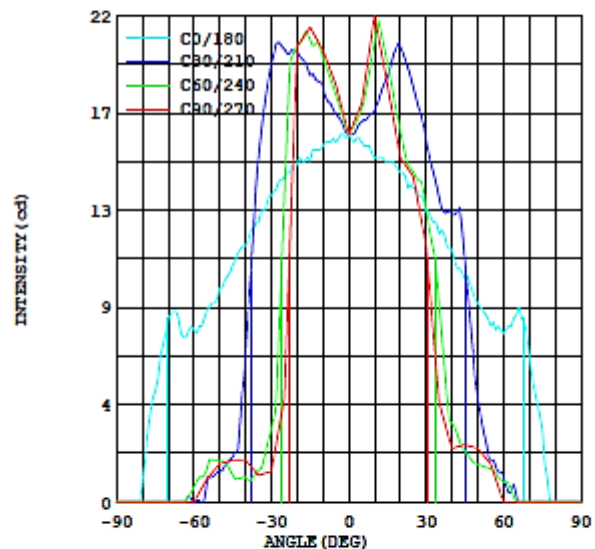
| TEST DATA: | | | | | |
|---------------------|---------|--------------------|----------|--------------------------|--|
| MODEL: | LW E67C | Imax (cd) : | 21.52 | η street_up (%) : | |
| NOMINAL POWER (W) : | 5 | MAXIMUM @ (C,y) : | 270,10.0 | η street_down (%) : | |
| RATED VOLTAGE (V) : | 24 | TOTAL FLUX (lm) : | 28.12 | η house_up (%) : | |
| NOMINAL FLUX (lm) : | 58.0 | EFFICIENCY (%) : | 48.5 | η house_down (%) : | |
| TEST FLUX (lm) : | 58.00 | η up (%) : | | | |
| LAMPS QUANTITY : | 1 | η down (%) : | | | |

INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS



INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS

LUMINOUS INTENSITY DISTRIBUTION



Test:U:23.70V I:0.227A P:5.400W PF:1.000

Test System:LSG-1800
Temperature:25.3DEG
Operators:Vacca Ugo
Test Date:06-27-2012

Test Set: 3.0deg/s B-Beta (TYPE B)
Humidity:65.0%
Test Distance:13.020 m
Remarks: 11

In modo analogo, nella parte alta del report si dispone di una tabella indicante:

- Il tipo di LED utilizzato: in questo caso è uguale al precedente;
- La potenza nominale: 5W (approssimata al numero intero senza la virgola) richiesta dal carico che assorbe una corrente $I=0,227A$ e richiede una tensione $V=24V$. Si ricorda che le due stringhe LED, essendo collegate in parallelo, assorbiranno ciascuna una corrente

stabilizzata di $\sim 112\text{mA}$. Nel report, in basso, è indicata la potenza nominale effettiva $P=5,4\text{W}$ e relativo $\cos\varphi=1$;

- Flusso nominale (uguale al “flusso testato”): il valore 58lm è stato aggiunto manualmente poiché, come già argomentato prima, si considera il valore corretto di flusso luminoso nominale $[\text{lm}]$ delle due stringhe di sorgenti LED estratto dalla misura precedente effettuata con sfera integratrice.

I 58lm indicati corrispondono infatti a due volte il flusso risultato dalla prova **b)** uguale a $29,1\text{lm}$;

- Riguardo la quantità di lampade, si fa sempre riferimento a 2 stringhe LED da 45cm (formanti per convenzione “una lampada”).
- Intensità luminosa massima I_{MAX} ($21,52\text{cd}$) indica il valore massimo di candele emesse dall’apparecchio in una data direzione.
- Il flusso luminoso totale indicato ($28,12\text{lm}$) è quello che effettivamente sarà fornito; la differenza fra il flusso totale e il flusso nominale è motivata dal fatto che una parte di flusso nominale si perderà all’interno del tubo facente parte della struttura dell’apparecchio, in direzioni non utili e attraverso l’ottica;
- L’efficienza, infatti, valuta il rendimento dato dal rapporto fra il flusso effettivo (totale) e il flusso nominale dell’apparecchio ($28,12/58=48,5\%$);

Dai grafici si nota che l’intensità luminosa massima di $21,53\text{cd}$ sarà data per una angolazione di 10° sul piano C90/270.

Dall’analisi delle curve e del grafico dettagliato seguente, si può notare che l’intensità luminosa sulla sezione C0/180 si distribuisce in maniera omogenea e pressoché simmetrica, la curva di intensità luminosa appare meno frastagliata rispetto al caso **a’)**, probabilmente perché una maggior densità di numero di LED contribuisce ad avere un’intensità radiale più uniforme.

L’angolo d’emissione complessivo è pari ad un angolo di poco maggiore di 140° , arrivando ad un’intensità luminosa pari a $11,86\text{cd}$ ad inclinazioni di $+35^\circ$, $12,37\text{cd}$ ad inclinazioni di -35° dalla normale e raggiungendo valori massimi di circa 16cd sulla normale 0° .

Nella sezione C90/270 (che appare specchiata rispetto al caso **a’)**) sulla curva è presente una forte componente asimmetrica. Copre un angolo complessivo minore rispetto a quello della precedente sezione ($\sim 100^\circ$), arrivando ad un’intensità pari a $14,4\text{cd}$ per un angolo di $+25^\circ$ e a $4,577$ per un angolo di -25° . Raggiunge il massimo di intensità luminosa pari a $21,52\text{cd}$ per un angolo di $+10^\circ$.

- Nel report, in basso, si dispone delle caratteristiche di misurazione analoghe a quelle della precedente misura:
 - il nome nell'apparecchio di misura (LSG-1800);
 - temperatura di lavoro (25,3°C);
 - operatore e data misurazione;
 - settaggio: velocità di rotazione 3,0°/s con metodo B-β;
 - umidità (65%);
 - distanza dal detector device (13,020m).

Si può osservare, in base a quanto constatato da queste ultime due prove, che il LED è caratterizzato nel suo solido fotometrico da una forte componente asimmetrica.

In particolare ciò si osserva quanto più ci si sposta dai piani di sezione longitudinale verso quelli di sezione trasversale; ossia, dal piano C0/180 (passando dai piani C30/210 e C60/240) fino alla sezione trasversale del piano C90/270, si assiste ad un'evoluzione di una curva fotometrica relativamente simmetrica (curva ciano) e con un elevato angolo di apertura ad una curva fotometrica stretta e con forte asimmetria (curva rossa).

Ciò può essere imputato a due caratteristiche fisiche dell'apparecchio in studio.

- I LED si trovano “incastonati” nella struttura tubolare; anche solo quest'aspetto fa diminuire gradualmente l'apertura dell'angolo di emissione nelle sezioni vicine alla trasversale, fino ad un massimo nel piano C90/270.
- Imperfezioni nella sezione del profilato di PMMA contenente le stringhe LED. Passando dalla sezione longitudinale C0/180 a quella trasversale C90/270 si assiste ad un graduale frastagliamento della curva fotometrica. Questo avviene quanto più trasversalmente viene tagliata la sezione di PMMA, che presenta curvature variabili e imperfezioni di fusione, trasparenza e riflessione del pezzo.

Al momento sono in studio nuovi materiali ottici atti a migliorare questi aspetti. Il miglioramento è volto in particolar modo a ricercare materiali otticamente trasparenti al passaggio della luce, e con assenza di interflessioni interne. Per evitare la micro-scanalatura della parte curva, si sta studiando una forma precisa di estrusione che renda la superficie totalmente liscia permettendo un'emissione, quindi una curva fotometrica quanto più possibile omogenea.

In dettaglio si può osservare dalla tabella seguente l'andamento dell'intensità luminosa in funzione della sezione e dell'angolo di emissione.

ZONAL FLUX DIAGRAM

Report number:

| | | |
|-------------------------|----------------------|-------------|
| MANUFACTURER: Pro Light | Address: | |
| NAME: b') | TYPE: Mod.Verde19Led | WEIGHT: |
| SPECIFICATION: | DIMENSION: | SERIAL No.: |

| y | C0 | C45 | C90 | C135 | C180 | C225 | C270 | C315 | y | Φ zone | Φ total |
|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 5.0 | 15.93 | 17.68 | 18.47 | 17.60 | 15.93 | 17.18 | 17.63 | 17.14 | 0- 5 | 0.404 | 0.404 |
| 10.0 | 15.76 | 18.85 | 20.00 | 18.85 | 15.25 | 19.01 | 21.52 | 19.03 | 5- 10 | 1.290 | 1.694 |
| 15.0 | 15.08 | 20.18 | 21.02 | 20.04 | 15.08 | 20.58 | 18.47 | 20.83 | 10- 15 | 2.246 | 3.940 |
| 20.0 | 14.91 | 20.75 | 20.17 | 20.43 | 14.57 | 18.12 | 15.25 | 18.78 | 15- 20 | 3.069 | 7.009 |
| 25.0 | 14.40 | 19.33 | 4.577 | 18.88 | 13.90 | 15.60 | 14.40 | 15.81 | 20- 25 | 3.536 | 10.54 |
| 30.0 | 13.56 | 11.42 | 1.356 | 10.83 | 12.88 | 13.94 | 11.35 | 14.19 | 25- 30 | 3.457 | 14.00 |
| 35.0 | 12.37 | 2.724 | 1.186 | 2.188 | 11.86 | 12.39 | 4.407 | 12.84 | 30- 35 | 3.188 | 17.19 |
| 40.0 | 11.35 | 1.310 | 1.864 | 1.218 | 11.18 | 7.923 | 2.373 | 8.381 | 35- 40 | 2.748 | 19.94 |
| 45.0 | 10.51 | 1.195 | 1.864 | 1.177 | 9.832 | 3.309 | 2.542 | 3.479 | 40- 45 | 2.367 | 22.30 |
| 50.0 | 9.493 | 0.206 | 1.695 | 0.016 | 8.815 | 1.951 | 2.373 | 1.858 | 45- 50 | 2.019 | 24.32 |
| 55.0 | 8.476 | 0 | 1.017 | 0.483 | 7.797 | 1.182 | 1.695 | 1.415 | 50- 55 | 1.604 | 25.93 |
| 60.0 | 7.628 | 0 | 0 | 0 | 7.458 | 1.066 | 0 | 1.194 | 55- 60 | 1.108 | 27.04 |
| 65.0 | 7.458 | 0 | 0 | 0 | 8.306 | 0 | 0 | 0.692 | 60- 65 | 0.634 | 27.67 |
| 70.0 | 8.136 | 0 | 0 | 0 | 6.441 | 0 | 0 | 0 | 65- 70 | 0.301 | 27.97 |
| 75.0 | 4.916 | 0 | 0 | 0 | 3.220 | 0 | 0 | 0 | 70- 75 | 0.119 | 28.09 |
| 80.0 | 0.848 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75- 80 | 0.031 | 28.12 |
| 85.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80- 85 | 0.001 | 28.12 |
| 90.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85- 90 | 0 | 28.12 |
| 95.0 | | | | | | | | | 90- 95 | | |
| 100.0 | | | | | | | | | 95-100 | | |
| 105.0 | | | | | | | | | 100-105 | | |
| 110.0 | | | | | | | | | 105-110 | | |
| 115.0 | | | | | | | | | 110-115 | | |
| 120.0 | | | | | | | | | 115-120 | | |
| 125.0 | | | | | | | | | 120-125 | | |
| 130.0 | | | | | | | | | 125-130 | | |
| 135.0 | | | | | | | | | 130-135 | | |
| 140.0 | | | | | | | | | 135-140 | | |
| 145.0 | | | | | | | | | 140-145 | | |
| 150.0 | | | | | | | | | 145-150 | | |
| 155.0 | | | | | | | | | 150-155 | | |
| 160.0 | | | | | | | | | 155-160 | | |
| 165.0 | | | | | | | | | 160-165 | | |
| 170.0 | | | | | | | | | 165-170 | | |
| 175.0 | | | | | | | | | 170-175 | | |
| 180.0 | | | | | | | | | 175-180 | | |
| DE3 | LUMINOUS INTENSITY:cd | | | | | | | | | UNIT:lm | |

Il report segue con grafici e tabelle dell'apparecchio b'), che tuttavia si ometteranno per snellire l'elaborato:

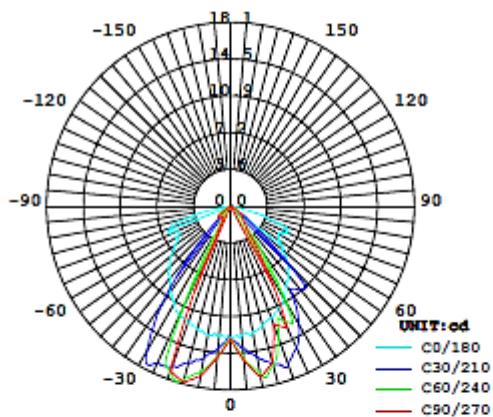
- grafici isocandela;
- grafico isolux;
- tabelle di distribuzione di intensità luminosa.

7.2.4 Prova c'): apparecchio illuminante 10 LED - SEOUL

Prova di 1m di apparecchio illuminante completo, di tipologia c'): 2 stringhe (per l'esattezza c₁) e c₂)) composte da 5 LED KWT801-S – SEOUL ciascuna, per un totale di 10 LED.

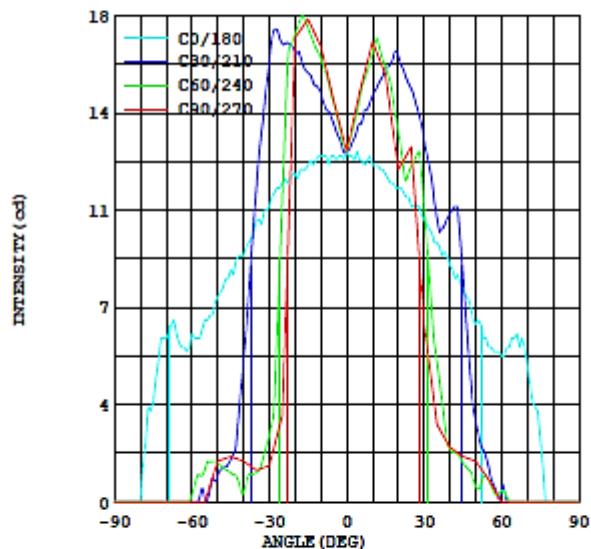
| TEST DATA: | | | | | |
|---------------------|----------|----------------------------|---------|--------------------------|--|
| MODEL: | KWT801-S | Imax (cd) : | 18.11 | η street_up (%) : | |
| NOMINAL POWER (W) : | 1 | MAXIMUM @ (C, γ) : | 45,21.0 | η street_down (%) : | |
| RATED VOLTAGE (V) : | 24 | TOTAL FLUX (lm) : | 22.58 | η house_up (%) : | |
| NOMINAL FLUX (lm) : | 49.0 | EFFICIENCY (%) : | 46.1 | η house_down (%) : | |
| TEST FLUX (lm) : | 49.00 | η up (%) : | | | |
| LAMPS QUANTITY: | 1 | η down (%) : | | | |

INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS



INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS

LUMINOUS INTENSITY DISTRIBUTION



Test:U:24.00V I:0.041A P:1.000W PF:1.000

Test System:LSG-1800
Temperature:25.3DEG
Operators:Vacca Ugo
Test Date:06-27-2012

Test Set: 3.0deg/s B-Beta (TYPE B)
Humidity:65.0%
Test Distance:13.020 m
Remarks: 11

Analogamente a prima si dispone nella tabella del report su indicato:

- Il tipo di LED utilizzato: KWT801-S – SEOUL, differente dal precedente;
- La potenza nominale 1W (approssimata al numero intero senza la virgola) richiesta dal carico che assorbe una corrente I=0,041A e richiede una tensione V=24V. Le due stringhe LED, essendo collegate in parallelo, assorbiranno ciascuna una corrente stabilizzata di

~20mA. Nella parte in basso del report viene indicata la potenza nominale effettiva uguale ad 1W e relativo $\cos\phi=1$;

- Flusso nominale (uguale al “flusso testato”): valore di 49lm è stato aggiunto manualmente poiché si considera il valore corretto di flusso luminoso nominale delle due stringhe di sorgenti LED, valore estratto dalla misura precedente effettuata con sfera integratrice. I 49lm indicati corrispondono infatti ad un approssimazione in eccesso del doppio del flusso risultato dalla prova c’) uguale a 24,4lm, ossia la somma di 22,8lm di c_1) e 26lm di c_2).
- Riguardo la quantità di lampade, si fa sempre riferimento a 2 stringhe LED da 45cm (formanti per convenzione “una lampada”).
- I_{MAX} (18,11cd) indica il valore massimo di candele emesse dall’apparecchio in una data direzione.
- Il flusso totale indicato (22,58lm) è quello che effettivamente sarà fornito; la differenza fra il flusso totale e il flusso nominale è motivata dal fatto che una parte di flusso nominale si perderà all’interno del tubo facente parte della struttura dell’apparecchio, in direzioni non utili e attraverso l’ottica diffondente;
- L’efficienza, infatti, valuta il rendimento dato dal rapporto fra il flusso effettivo (totale) e il flusso nominale dell’apparecchio ($22,58/49=46,1\%$);

Dai grafici notiamo che l’intensità luminosa massima di 18,11cd si avrà per una angolazione di -15° sul piano C90/270.

Dall’analisi delle curve e del grafico dettagliato seguente, si può notare che l’intensità luminosa sulla sezione C0/180 si distribuisce in maniera pressoché omogenea e simmetrica, la curva di intensità luminosa appare frastagliata rispetto al caso b’) ma più omogenea rispetto a’). Probabilmente perché avendo 5 LED si ha una minor uniformità di intensità radiale rispetto b’), ma una migliore uniformità rispetto a’) possedendo LED più performanti.

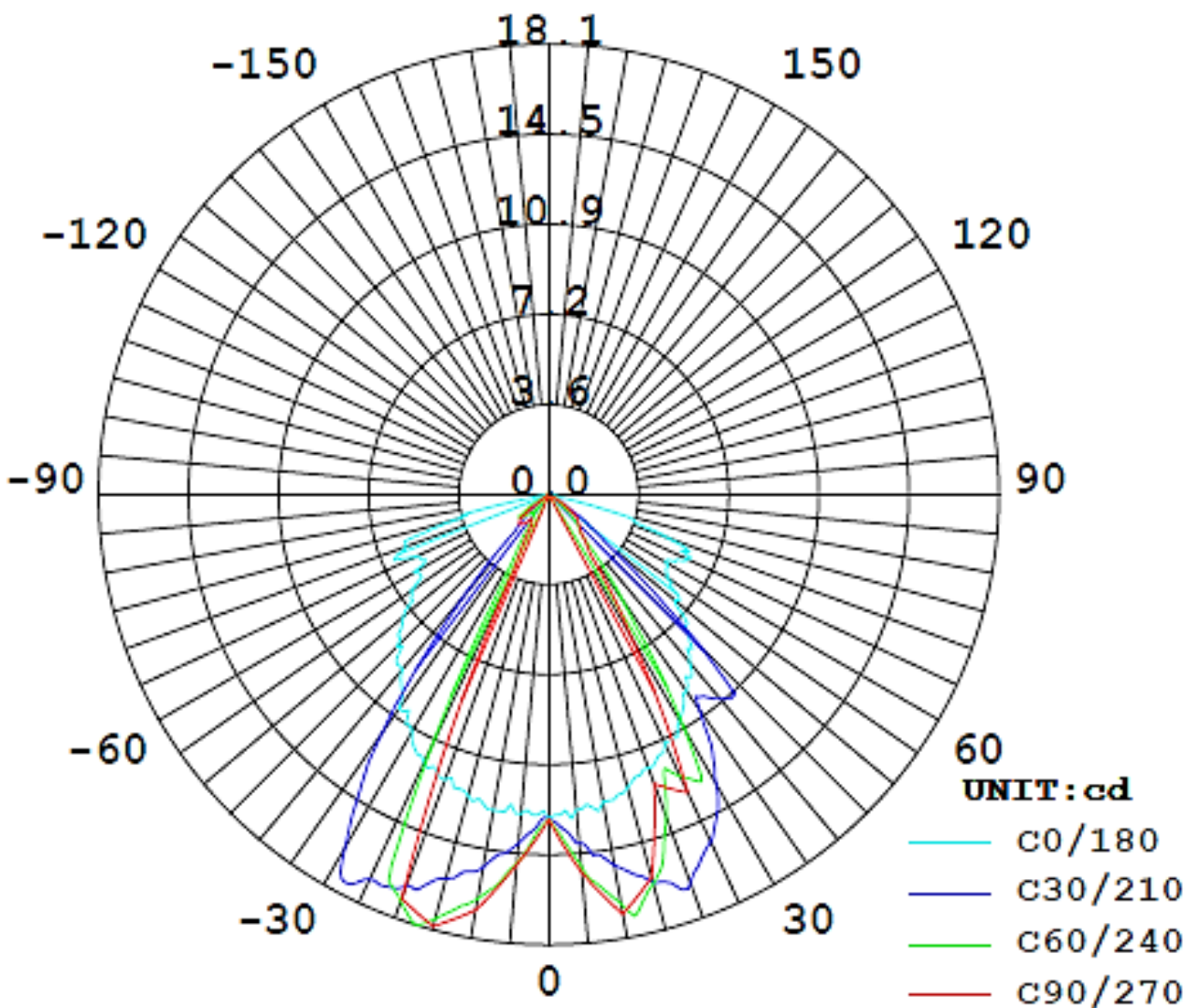
L’angolo d’emissione complessivo è pari ad un angolo di poco maggiore di 150° , arrivando ad un intensità luminosa pari a 9,66cd ad inclinazioni di $+35^\circ$, 10,51cd ad inclinazioni di -35° dalla normale e raggiungendo valori massimi di circa 13 cd sulla normale 0° .

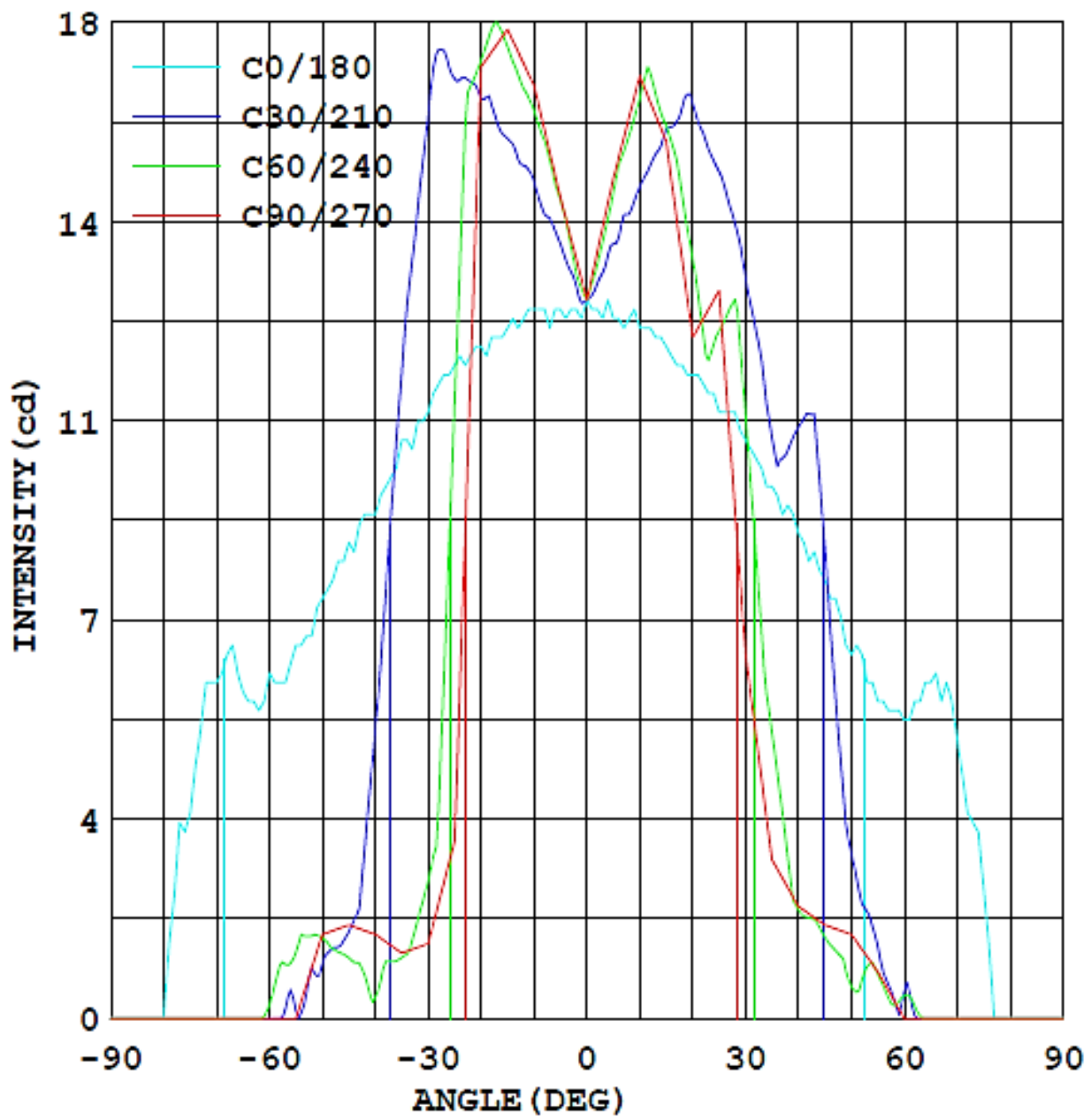
Nella sezione C90/270 sulla curva è presente una forte componente asimmetrica. Copre un angolo complessivo minore rispetto a quello della precedente sezione ($\sim 100^\circ$), arrivando ad un intensità pari a 13,22cd per un angolo di $+25^\circ$ e a 3,22cd per un angolo di -25° . Raggiunge il massimo di intensità luminosa pari a 17,96cd per un angolo di -15° .

- Nella parte estrema del report si dispone delle caratteristiche di misurazione analoghe a quelle della precedente misura:
 - il nome nell’apparecchio di misura (LSG-1800);
 - temperatura di lavoro ($25,3^\circ\text{C}$);

- operatore e data misurazione;
- settaggio: velocità di rotazione 3,0°/s con metodo B-β;
- umidità (65%);
- distanza dal detector device (13,020m).

Si vede in dettaglio i grafici, rispettivamente in coordinate polari e cartesiane, del solido fotometrico





ZONAL FLUX DIAGRAM

Report number:

| | | |
|-------------------------|-----------------------|-------------|
| MANUFACTURER: Pro Light | Address: | |
| NAME: c') | TYPE: Mod. Bianco5LED | WEIGHT: |
| SPECIFICATION: | DIMENSION: | SERIAL No.: |

| y | C0 | C45 | C90 | C135 | C180 | C225 | C270 | C315 | γ | Φ zone | Φ total |
|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 5.0 | 12.88 | 14.54 | 14.91 | 14.50 | 12.71 | 14.62 | 15.25 | 14.60 | 0- 5 | 0.331 | 0.331 |
| 10.0 | 12.88 | 15.87 | 16.95 | 15.70 | 12.54 | 15.87 | 17.12 | 16.24 | 5- 10 | 1.076 | 1.407 |
| 15.0 | 12.54 | 16.79 | 17.96 | 16.78 | 12.20 | 16.80 | 15.93 | 17.10 | 10- 15 | 1.882 | 3.289 |
| 20.0 | 12.20 | 17.81 | 17.29 | 17.21 | 11.69 | 15.29 | 12.37 | 15.93 | 15- 20 | 2.594 | 5.884 |
| 25.0 | 11.86 | 15.99 | 3.220 | 15.01 | 11.01 | 12.66 | 13.22 | 13.19 | 20- 25 | 2.973 | 8.857 |
| 30.0 | 11.01 | 9.089 | 1.356 | 8.262 | 10.51 | 11.95 | 6.611 | 12.13 | 25- 30 | 2.862 | 11.72 |
| 35.0 | 10.51 | 2.055 | 1.186 | 1.704 | 9.662 | 10.52 | 2.881 | 10.99 | 30- 35 | 2.540 | 14.26 |
| 40.0 | 9.154 | 1.167 | 1.525 | 1.163 | 8.815 | 4.969 | 2.034 | 4.986 | 35- 40 | 2.187 | 16.44 |
| 45.0 | 8.645 | 0 | 1.695 | 0 | 7.967 | 1.668 | 1.695 | 2.158 | 40- 45 | 1.879 | 18.32 |
| 50.0 | 7.628 | 0.178 | 1.525 | 0 | 6.611 | 1.310 | 1.525 | 1.348 | 45- 50 | 1.571 | 19.89 |
| 55.0 | 6.780 | 0 | 0 | 0 | 5.763 | 0.800 | 0.848 | 1.023 | 50- 55 | 1.206 | 21.10 |
| 60.0 | 6.272 | 0 | 0 | 0 | 5.424 | 0.171 | 0 | 0 | 55- 60 | 0.760 | 21.86 |
| 65.0 | 5.933 | 0 | 0 | 0 | 6.102 | 0 | 0 | 0 | 60- 65 | 0.399 | 22.26 |
| 70.0 | 6.102 | 0 | 0 | 0 | 5.085 | 0 | 0 | 0 | 65- 70 | 0.206 | 22.47 |
| 75.0 | 3.729 | 0 | 0 | 0 | 2.373 | 0 | 0 | 0 | 70- 75 | 0.089 | 22.56 |
| 80.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75- 80 | 0.022 | 22.58 |
| 85.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80- 85 | 0 | 22.58 |
| 90.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85- 90 | 0 | 22.58 |
| 95.0 | | | | | | | | | 90- 95 | | |
| 100.0 | | | | | | | | | 95-100 | | |
| 105.0 | | | | | | | | | 100-105 | | |
| 110.0 | | | | | | | | | 105-110 | | |
| 115.0 | | | | | | | | | 110-115 | | |
| 120.0 | | | | | | | | | 115-120 | | |
| 125.0 | | | | | | | | | 120-125 | | |
| 130.0 | | | | | | | | | 125-130 | | |
| 135.0 | | | | | | | | | 130-135 | | |
| 140.0 | | | | | | | | | 135-140 | | |
| 145.0 | | | | | | | | | 140-145 | | |
| 150.0 | | | | | | | | | 145-150 | | |
| 155.0 | | | | | | | | | 150-155 | | |
| 160.0 | | | | | | | | | 155-160 | | |
| 165.0 | | | | | | | | | 160-165 | | |
| 170.0 | | | | | | | | | 165-170 | | |
| 175.0 | | | | | | | | | 170-175 | | |
| 180.0 | | | | | | | | | 175-180 | | |
| DEG | LUMINOUS INTENSITY:cd | | | | | | | | | UNIT:lm | |

Il report segue con grafici e tabelle dell'apparecchio c'), che tuttavia si ometteranno per snellire l'elaborato:

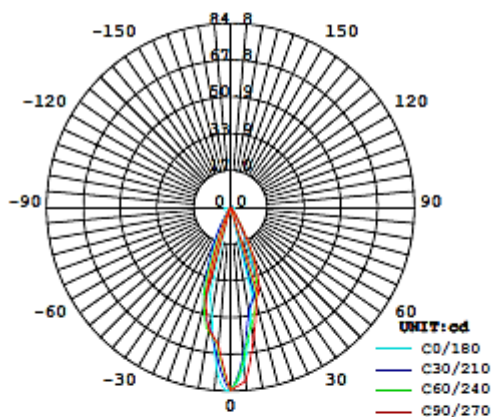
- grafici isocandela;
- grafico isolux;
- tabelle di distribuzione di intensità luminosa.

7.2.5 Prova d'): apparecchio illuminante 10 LED con ottica - SEOUL

Prova di 1m di apparecchio illuminante completo, di tipologia d'): 2 stringhe (per l'esattezza c₁) e c₂) composte da 5 LED KWT801-S – SEOUL ciascuna, per un totale di 10 LED ognuno con una lente ottica secondaria applicata.

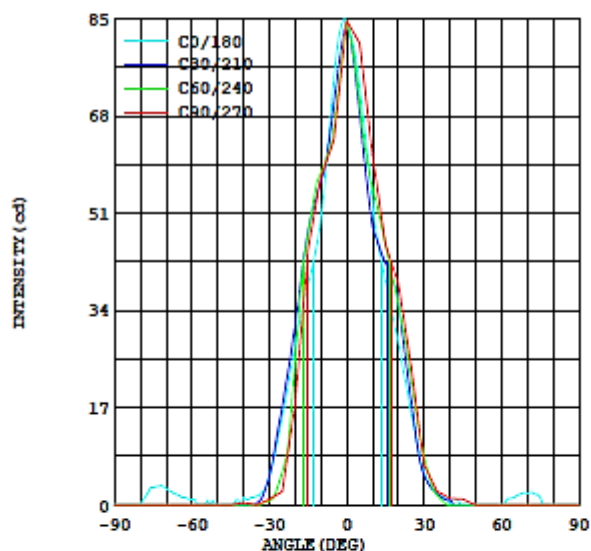
| TEST DATA: | | | | | |
|--------------------|----------|---------------------------|---------|-------------------------|--|
| MODEL: | KWT801-S | Imax (cd): | 97.93 | η street_up (%): | |
| NOMINAL POWER (W): | 1 | MAXIMUM @ (C, γ): | 315,7.0 | η street_down (%): | |
| RATED VOLTAGE (V): | 24 | TOTAL FLUX (lm): | 27.57 | η house_up (%): | |
| NOMINAL FLUX (lm): | 49.0 | EFFICIENCY (%): | 56.3 | η house_down (%): | |
| TEST FLUX (lm): | 49.00 | η up (%): | | | |
| LAMPS QUANTITY: | 1 | η down (%): | | | |

INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS



INTENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM
IN C PLANS

LUMINOUS INTENSITY DISTRIBUTION



Test:U:24.10V I:0.041A P:1.000W PF:1.000

Test System:LSG-1800
Temperature:25.3DEG
Operators:Vacca Ugo
Test Date:06-27-2012

Test Set: 3.0deg/s B-Beta (TYPE B)
Humidity:65.0%
Test Distance:13.020 m
Remarks: 11

Questa tipologia di apparecchio si differenzia dalla precedente c') solo per l'applicazione di una lente ottica aggiuntiva su ogni LED.

Questa lente ottica ha lo scopo di concentrare il flusso in una direzione centrale, quindi chiudere il fascio luminoso. È stata provata per valutare il suo comportamento ottico per un possibile utilizzo nel nostro contesto di installazione.

A tal proposito notiamo a prima vista che tutte le curve del solido fotometrico sembrano quasi sovrapporsi; hanno tutte un comportamento simile in tutte le sezioni di piano, con un punto massimo in prossimità della normale a 0° .

I parametri riguardanti il LED e i parametri elettrici rimangono uguali a quelli della precedente tipologia **c'**). Gli unici a variare sono, ragionevolmente, l'intensità luminosa massima, il flusso totale e l'efficienza. La variazione di questi è appunto dovuta alla sola applicazione della lente ottica su ogni LED, che, chiudendo il flusso luminoso, concentra l'intensità e evita le perdite in altre direzioni non utili, avendo così un'alta intensità luminosa massima, un flusso totale e un'efficienza più alte del caso precedente **c'**):

- I_{MAX} (97,93cd contro 18,11cd di **c'**) viene raggiunta per tutte le curve delle varie sezioni per un angolo di circa 0° .
- Il flusso totale indicato (27,57cd contro 22,58lm di **c'**);
- L'efficienza data dal rapporto fra il flusso effettivo (totale) e il flusso nominale dell'apparecchio sarà $(27,57/49=56,3\%)$;

Tuttavia si scarterà a priori questa ipotesi di tipologia **d'**) poiché risulta un flusso luminoso troppo direzionale, e un'apertura, in tutte le sezioni troppo ristretta ($\sim 50^\circ$) per il caso applicativo in esame. Verrà evitato lo sviluppo dei calcoli con il software Dialux poiché si avrebbe sicuramente un'insufficiente illuminazione dei 2m di marciapiede e una forte disuniformità tra gli apparecchi posti in serie uno all'altro.

ZONAL FLUX DIAGRAM

Report number:

| | | |
|-------------------------|---------------------------|-------------|
| MANUFACTURER: Pro Light | Address: | |
| NAME: d') | TYPE: Mod. Bianco5LEDLent | WEIGHT: |
| SPECIFICATION: | DIMENSION: | SERIAL No.: |

| γ | C0 | C45 | C90 | C135 | C180 | C225 | C270 | C315 | γ | Φ zone | Φ total |
|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 5.0 | 74.24 | 67.79 | 63.57 | 65.37 | 72.89 | 68.18 | 80.52 | 91.52 | 0- 5 | 1.845 | 1.845 |
| 10.0 | 50.00 | 57.48 | 57.29 | 53.84 | 52.89 | 52.13 | 61.02 | 77.14 | 5- 10 | 4.636 | 6.481 |
| 15.0 | 38.31 | 48.84 | 44.58 | 45.67 | 38.98 | 46.30 | 45.43 | 49.18 | 10- 15 | 6.024 | 12.50 |
| 20.0 | 27.97 | 32.52 | 17.63 | 26.40 | 28.47 | 32.37 | 38.65 | 39.06 | 15- 20 | 6.233 | 18.73 |
| 25.0 | 15.42 | 11.00 | 2.373 | 8.827 | 15.76 | 19.49 | 24.07 | 23.13 | 20- 25 | 4.785 | 23.52 |
| 30.0 | 5.085 | 1.293 | 1.017 | 2.015 | 5.594 | 8.391 | 6.950 | 10.62 | 25- 30 | 2.557 | 26.08 |
| 35.0 | 1.525 | 0 | 0 | 0 | 1.695 | 1.933 | 2.373 | 4.060 | 30- 35 | 0.894 | 26.97 |
| 40.0 | 1.356 | 0 | 0.424 | 0 | 0.000 | 0 | 1.186 | 0 | 35- 40 | 0.278 | 27.25 |
| 45.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.017 | 0 | 40- 45 | 0.088 | 27.34 |
| 50.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.000 | 0 | 0 | 0 | 45- 50 | 0.026 | 27.36 |
| 55.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.000 | 0 | 0 | 0 | 50- 55 | 0.012 | 27.38 |
| 60.0 | 1.017 | 0 | 0 | 0 | 0.000 | 0 | 0 | 0 | 55- 60 | 0.021 | 27.40 |
| 65.0 | 1.695 | 0 | 0 | 0 | 1.356 | 0 | 0 | 0 | 60- 65 | 0.049 | 27.44 |
| 70.0 | 2.881 | 0 | 0 | 0 | 2.034 | 0 | 0 | 0 | 65- 70 | 0.058 | 27.50 |
| 75.0 | 3.051 | 0 | 0 | 0 | 1.356 | 0 | 0 | 0 | 70- 75 | 0.049 | 27.55 |
| 80.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75- 80 | 0.015 | 27.57 |
| 85.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80- 85 | 0 | 27.57 |
| 90.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85- 90 | 0 | 27.57 |
| 95.0 | | | | | | | | | 90- 95 | | |
| 100.0 | | | | | | | | | 95-100 | | |
| 105.0 | | | | | | | | | 100-105 | | |
| 110.0 | | | | | | | | | 105-110 | | |
| 115.0 | | | | | | | | | 110-115 | | |
| 120.0 | | | | | | | | | 115-120 | | |
| 125.0 | | | | | | | | | 120-125 | | |
| 130.0 | | | | | | | | | 125-130 | | |
| 135.0 | | | | | | | | | 130-135 | | |
| 140.0 | | | | | | | | | 135-140 | | |
| 145.0 | | | | | | | | | 140-145 | | |
| 150.0 | | | | | | | | | 145-150 | | |
| 155.0 | | | | | | | | | 150-155 | | |
| 160.0 | | | | | | | | | 155-160 | | |
| 165.0 | | | | | | | | | 160-165 | | |
| 170.0 | | | | | | | | | 165-170 | | |
| 175.0 | | | | | | | | | 170-175 | | |
| 180.0 | | | | | | | | | 175-180 | | |
| DEG | LUMINOUS INTENSITY:cd | | | | | | | | | UNIT:lm | |

Il report segue con grafici e tabelle dell'apparecchio d'), che tuttavia si ometteranno per snellire l'elaborato:

- grafici isocandela;
- grafico isolux;
- tabelle di distribuzione di intensità luminosa.

7.3 Considerazioni

È stato analizzato 1m di apparecchio illuminante prototipo delle quattro tipologie **a'**),**b'**),**c'**) e **d'**). Interpretando i report risultanti dalle misurazioni effettuate si è arrivato ad una prima conclusione di utilizzo della tipologia **c'**) per l'installazione di un'illuminazione di emergenza nella galleria in esame, come in prima approssimazione ci si aspettava dalle osservazioni del calcolo preliminare.

In particolare la scelta sulla tipologia di apparecchio è stata argomentata dalle seguenti motivazioni:

- La tipologia **a'**) , come era emerso dal calcolo preliminare, è insufficiente per il caso in esame. Ha un intensità luminosa massima bassa non adatta allo scopo, un flusso luminoso nominale dei LED insufficiente e un flusso totale dell'apparecchio debole; anche l'efficienza ne risulta compromessa. L'apertura del fascio luminoso è insufficiente a coprire adeguatamente (e con livelli di illuminamento dettati dalla normativa) la larghezza della banchina.
- La tipologia **d'**) sebbene abbia delle buone qualità, la ristrettezza del fascio luminoso ne compromette l'uso nella applicazione specifica in studio.
- La tipologia **b'**) analizzando i suoi risultati sembra competitiva, ma comparandoli con la tipologia **c'**) se ne intuisce la motivazione che ha portato ad escluderla:
 - o La tipologia **b'**) monta LED meno performanti della tipologia **c'**), ossia ha un'efficienza luminosa minore, come si è visto dai risultati emersi dalla misura in sfera integratrice (vedi §7.1).
 - o Ha un assorbimento di potenza molto più elevata rispetto **c'**): 5W al metro contro 1W al metro.
 - o Per una tanto grande differenza a livello di assorbimento di potenza, la tipologia **b'**) ha un maggiorazione di flusso di soli 5,54lm e una maggiorazione di intensità luminosa di soli 3,41cd.
 - o A livello di materiale globalmente utilizzato per l'installazione, la tipologia di apparecchio **b'**) monta stringhe **b)** composte da 19 LED l'una (più componentistica elettronica), contro le stringhe **c)** della tipologia di apparecchio illuminante **c'**) che vantano solo 5 LED per stringa (più un regolatore di corrente e una resistenza).

Per queste osservazioni si considera più competitivo il LED KWT801-S – SEOUL e la tipologia di apparecchio illuminante **c'**).

Capitolo 8

Simulazione: software Dialux

Dalle prove effettuate si ottengono risultati stampati su file PDF. Questi risultano particolarmente utili all'osservazione e all'interpretazione umana, ma risultano pressoché illeggibili da parte di un programma computerizzato per implementarne una simulazione in un ambiente virtuale.

Per fare ciò i file risultati sono stati trasformati in .IES ottenendo così un file leggibile da un software di progettazione, calcolo e simulazione illuminotecnica quale Dialux.

8.1 Software Dialux e modello galleria

Dialux è uno dei più importanti programmi di progettazione illuminotecnica e pianificazione luminosa; permette di simulare l'illuminazione dentro e fuori gli ambienti, di calcolare e verificare in modo professionale tutti i parametri di un impianto d'illuminazione, fornendo risultati chiari e precisi.

Per simulare la nostra galleria di dimensioni stabilite, abbiamo reputato opportuno considerare solamente una sua percentuale di lunghezza effettiva, per non appesantire troppo il file programma e diminuire l'onere computazionale.

Non disponendo su Dialux di un modello galleria adatto alle nostre esigenze è stata realizzata la galleria in questione come modello semplificato; quindi tramite un'estrusione di un solido prismatico con un solido cilindrico.

Successivamente all'estrusione è stato inserito un solido prismatico raffigurante la banchina di esodo di larghezza 2m e un altro solido prismatico, posto più in basso, raffigurante la piattaforma del convoglio.

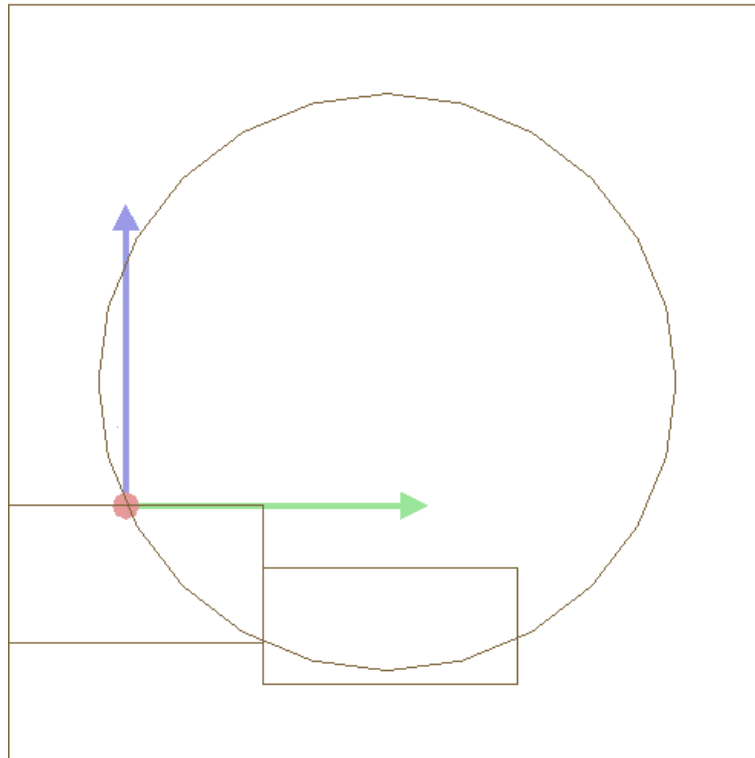


Fig.8.1 - Vista laterale modello galleria

La lunghezza ipotizzata dell'intero modello galleria necessaria e sufficiente per effettuare una simulazione realistica è stata definita di 100m.

Tutto il modello galleria è stato realizzato avendo fissato come centro dell'intero sistema un punto di assi cartesiani X,Y,Z.

Il punto, origine degli assi, si colloca esattamente a metà della lunghezza di 100m del modello, posto sul piano di calpestio della banchina, e nel punto di intersezione tra quest'ultima e le pareti curve verticali della galleria.

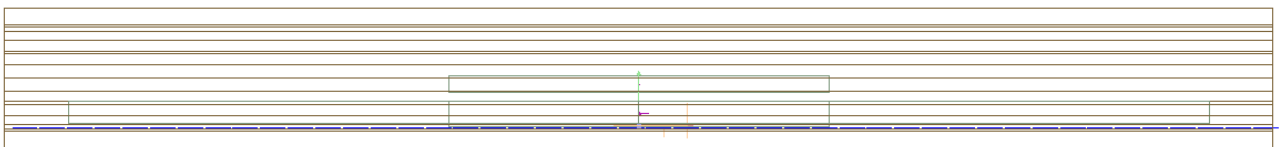


Fig.8.2 - Vista dall'alto modello galleria

Il modello galleria risulta così posizionato rispetto al punto di origine in modo comodo e congeniale per il successivo posizionamento degli apparecchi e delle superfici di calcolo (SC).

Da sottolineare che tutte le superfici del modello galleria, sono state considerate minimamente riflettenti; abbiamo considerato il materiale costituente la galleria cemento e gli abbiamo abbinato un effetto riflessione luminosa del 10%.

Il fattore di manutenzione impostato 0,7 risulta essere quello indicato per un locale “pulito” con ciclo di manutenzione triennale.

Gli apparecchi illuminanti, installati a parete in fila con un inclinazione di 50° dall’asse verticale e posti ad una altezza di 1.15m per tutta la lunghezza del modello galleria, risultano essere 92 distanziati solo dalle interconnessioni fra modulo e modulo e dai fissaggi a parete. Si vedrà nel corso del capitolo come questo numero di apparecchi potrebbe anche essere dimezzato senza diminuire troppo le caratteristiche illuminotecniche.

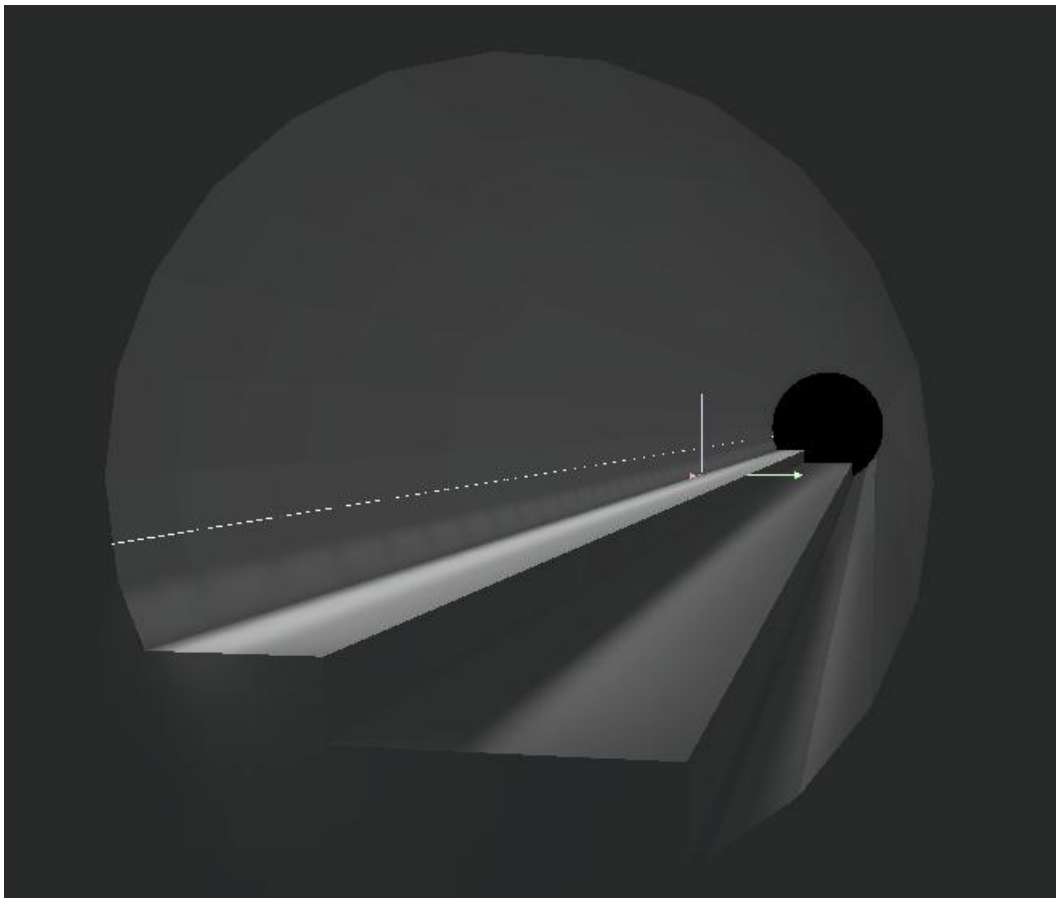


Fig.8.3 - Vista 3D modello galleria

Sono state analizzate tutte le differenti soluzioni appartenenti alle diverse tipologie di stringhe LED; tuttavia, per semplicità, in seguito si descriveranno i risultati ottenuti solamente dalla soluzione risultata ottimale.

L’apparecchio illuminante sarà costituito da stringhe di tipo c), il file .IES introdotto nel software, quindi, risulta essere quello ottenuto da un metro di apparecchio in prova con goniofotometro (prova tipo c’)).

8.2 Simulazioni e verifiche

Le prove effettuate considerando una successione di apparecchi di lunghezza di 1m formati da 2 stringhe da 45cm composte da 5 LED KWT801-S – SEOUL sono state divise in tre grandi categorie casistiche:

- 1) Funzionamento “normale” dell’illuminazione di sicurezza: si vedranno i risultati d’illuminamento ottenuti da varie superfici di calcolo, poste in punti di particolare interesse, in una situazione di funzionamento normale degli apparecchi (par. 8.2.2);
- 2) Funzionamento “normale con persone esodanti”: analogamente si osserveranno i risultati d’illuminamento ottenuti dalle medesime superfici di calcolo del caso precedente in una situazione di funzionamento normale degli apparecchi, considerando anche l’ingombro delle persone esodanti (par. 8.2.3);
- 3) Funzionamento “in caso di guasto di un metro di corrimano illuminante”: si osserverà come si presenterebbe la situazione illuminante su superfici di calcolo poste in prossimità di un guasto ad un apparecchio (par. 8.2.4);
- 4) Funzionamento “normale/economico” dell’illuminazione di sicurezza: questo caso nasce da un’osservazione sulla simulazione precedente, si proporrà una soluzione con un dimezzamento degli apparecchi illuminanti (par. 8.2.5);
- 5) Verifica attendibilità valori di illuminamento: in questa simulazione si verificherà in laboratorio l’attendibilità dei valori di illuminamento lux risultanti dalle simulazioni (par. 8.2.6).

Tutti i relativi report sono dettagliatamente riportati in *Allegato E*.

Prima di analizzare i risultati ottenuti per ogni casistica di funzionamento, è stato pensato di verificare il calcolo di preliminare effettuato, per comprovarne la correttezza dei valori di illuminamento medio e puntuale ottenuti.

8.2.1 Verifica di calcolo preliminare

Si considerano quindi solo un metro di apparecchio, formato da 2 stringhe da 45cm composte da 5 LED KWT801-S – SEOUL, posto ad altezza di 1,15m e angolato di 50° dalla verticale. Prenderemo in oggetto la superficie di calcolo di 1x2m².

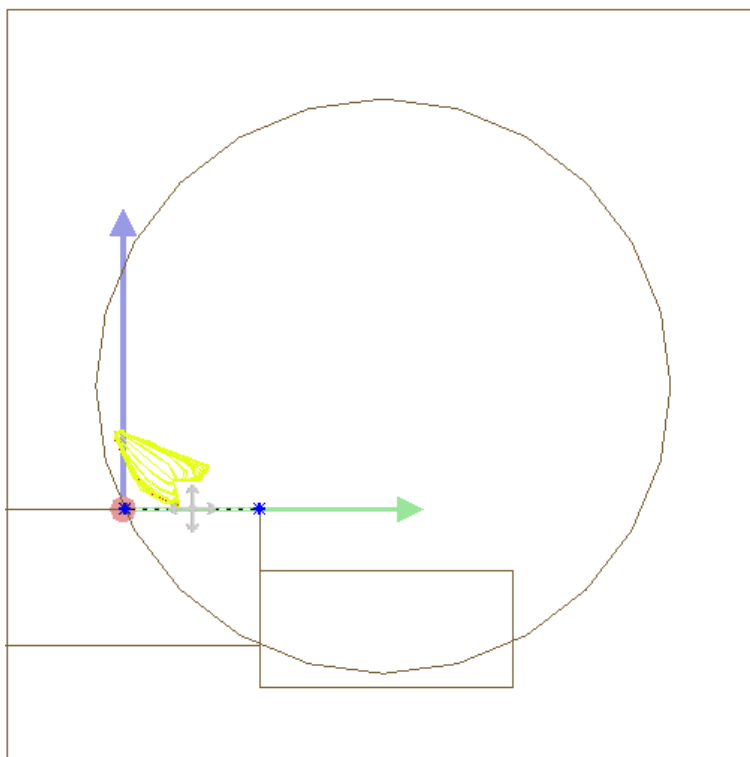


Fig.8.4 - Vista laterale SC modello galleria calcolo preliminare

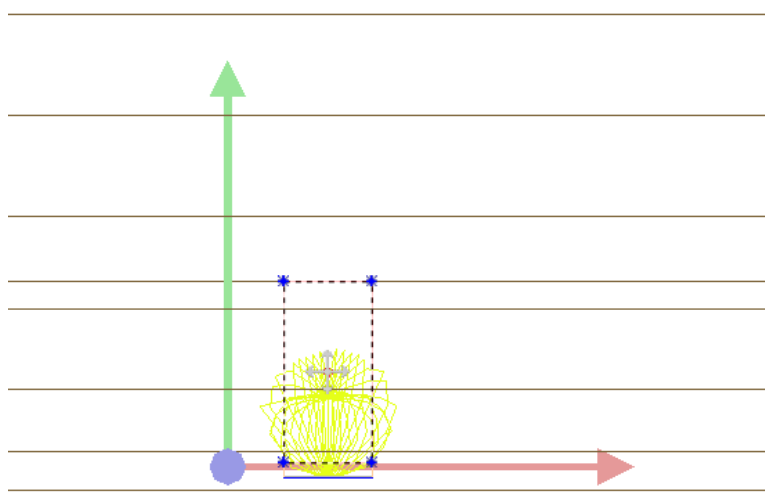


Fig.8.5 - Vista dall'alto SC modello galleria calcolo preliminare

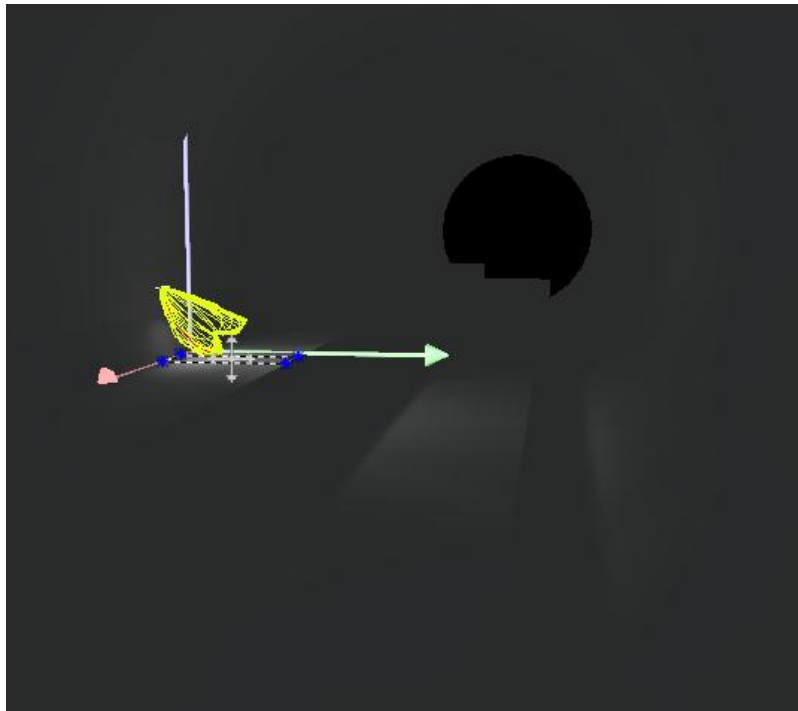
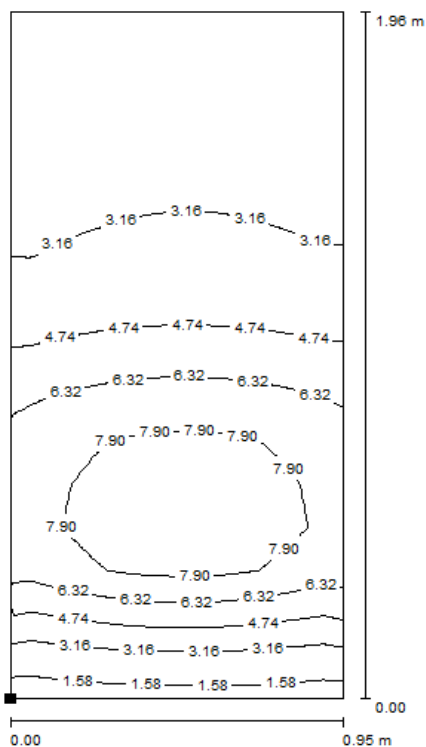


Fig.8.6 - Vista 3D SC modello galleria calcolo preliminare

Ciò che è emerso da questa prova è una corrispondenza con i calcoli preliminari.

Si nota dal report dei risultati come il valore di illuminamento medio sulla superficie di calcolo indicata ($E_m = 4,66lx$) sia in linea di massima corrispondente a quello preventivamente calcolato ($E_m = 5,078lx$).

1m di apparecchio Ill. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Calcolo preliminare / SC Centrale
 Banchina calpestio / Isolinee (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 16

Posizione della superficie nella scena
 esterna:
 Punto contrassegnato: (0.611 m, 0.039 m,
 0.000 m)



Reticolo: 128 x 16 Punti

| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 4.66 | 1.32 | 9.21 | 0.283 | 0.143 |

Per verificare l'illuminamento nel punto più svantaggioso, ossia il limite della banchina, ci si è affidato al report "tabella", che, a differenza delle curve Isolux, illustra dettagliatamente i valori di illuminamento ottenuti per ogni punto del reticolo della superficie di calcolo SC.

Posizionandosi sull'asse centrale del reticolo di calcolo si ottiene:

Tab.8.1 - Tabella valori lux SC posizione centrale

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1.900 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 |
| 1.777 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.37 | 2.36 | 2.36 |
| 1.654 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 2.63 |
| 1.532 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.92 | 2.92 | 2.92 | 2.92 | 2.92 | 2.92 | 2.92 | 2.92 | 2.91 | 2.91 |
| 1.409 | 3.19 | 3.19 | 3.19 | 3.20 | 3.20 | 3.20 | 3.20 | 3.20 | 3.20 | 3.20 | 3.20 | 3.20 | 3.20 |
| 1.287 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 |
| 1.164 | 4.07 | 4.07 | 4.07 | 4.08 | 4.08 | 4.08 | 4.08 | 4.08 | 4.08 | 4.08 | 4.08 | 4.07 | 4.07 |
| 1.042 | 5.24 | 5.24 | 5.24 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.24 | 5.24 |
| 0.919 | 5.93 | 5.93 | 5.93 | 5.94 | 5.94 | 5.94 | 5.94 | 5.94 | 5.94 | 5.94 | 5.94 | 5.93 | 5.93 |
| 0.797 | 7.46 | 7.46 | 7.46 | 7.47 | 7.47 | 7.47 | 7.47 | 7.47 | 7.47 | 7.47 | 7.47 | 7.44 | 7.44 |
| 0.674 | 8.48 | 8.48 | 8.48 | 8.49 | 8.49 | 8.49 | 8.49 | 8.49 | 8.49 | 8.49 | 8.49 | 8.47 | 8.47 |
| 0.551 | 8.61 | 8.61 | 8.61 | 8.63 | 8.63 | 8.63 | 8.63 | 8.63 | 8.63 | 8.63 | 8.63 | 8.62 | 8.62 |
| 0.429 | 8.85 | 8.85 | 8.85 | 8.86 | 8.86 | 8.86 | 8.86 | 8.86 | 8.86 | 8.86 | 8.86 | 8.83 | 8.83 |
| 0.306 | 8.41 | 8.41 | 8.41 | 8.42 | 8.42 | 8.42 | 8.42 | 8.42 | 8.42 | 8.42 | 8.42 | 8.41 | 8.41 |
| 0.184 | 4.65 | 4.65 | 4.65 | 4.66 | 4.66 | 4.66 | 4.66 | 4.66 | 4.66 | 4.66 | 4.66 | 4.63 | 4.63 |
| 0.061 | 2.13 | 2.13 | 2.13 | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.15 | 2.15 |
| m | 0.457 | 0.464 | 0.472 | 0.479 | 0.487 | 0.494 | 0.502 | 0.509 | 0.516 | 0.524 | 0.531 | 0.539 | 0.546 |

I valori lux ottenuti rispecchiano ciò che ci si aspettava.

I valori calcolati nel punto O (in asse con l'installazione dell'apparecchio) e nel punto P (nel punto estremo della banchina a 2m) risultavano dal §5.2:

- $E_O = \frac{I_{v,O}}{i^2} = 2,90 \text{ [lux]}$
- $E_P = \frac{I_{v,P}}{i^2} = 1,244 \text{ [lux]}$

Come è possibile notare questi valori sono confrontabili con quelli ottenuti dal software Dialux mostrati in Tab.8.1; si precisa che con la simulazione vantiamo di un miglioramento della simmetria, quindi dell'omogeneità dell'illuminamento.

8.2.2 Funzionamento “normale” dell’illuminazione di sicurezza

Si è iniziato ad analizzare il comportamento degli apparecchi illuminanti scelti nel modello galleria. Essendo installati sequenzialmente si potrebbe già immaginare un illuminamento di tipo continuo, senza interruzioni, con una buona uniformità sulla banchina, ma un’illuminazione debole sopra al metro, dovuto all’altezza d’installazione dell’apparecchio relativamente bassa (Fig.8.7).

La luce prodotta, in qualità di temperatura di colore, si aggira sui 7000K (come si nota dal §7.1); coincidente con una sensazione di luce fredda che nella situazione specifica di utilizzo si reputa adatta all’esigenza.

A questo punto per una valutazione ottimale dei valori lux ottenuti sono state scelte delle opportune superfici di calcolo.

Il posizionamento di quest’ultime deve essere pensato in un senso pratico: si vuole andare a vedere in diverse superfici e in particolari punti che illuminamento si ottiene, per constatarne l’effettiva corrispondenza alle norme e valutare l’efficienza della soluzione che si va a proporre.

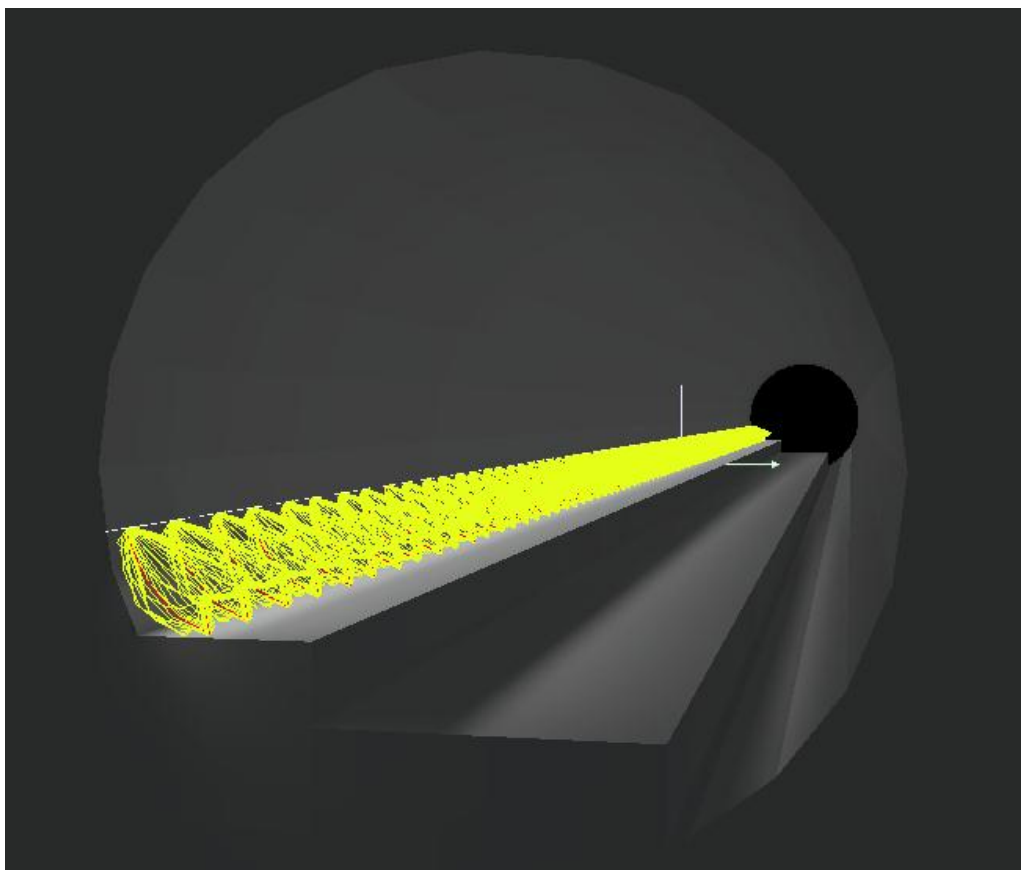


Fig.8.7 - Vista 3D illuminazione modello galleria funzionamento “normale”

Si definiscono differenti superfici di calcolo (SC):

- SC Centrale banchina calpestio;
- SC Centrale banchina $h=1m$;
- SC Estesa banchina calpestio;
- SC Centrale banchina verticale;
- SC Centrale piattaforma.

La prima superficie di calcolo, SC Centrale banchina calpestio, indica un'area di calcolo posta centralmente nel modello galleria; la volontà di posizionare in modo centrale la SC è stata fatta per non risentire dei possibili effetti di bordo delle estremità della galleria e per mettersi nel caso peggiore di situazione di buio totale.

L'altezza della SC è posta a zero, ossia ci si trova propriamente sul piano di calpestio ossia propriamente al livello della banchina (o marciapiede); l'idea è quella di andare quindi a vedere come si comporta l'illuminamento in un'area di lunghezza 30m e larghezza 2m (*Fig.8.8; Fig.8.9; Fig.8.10*).

Con l'occasione si evidenzia il principio di posizionamento delle superfici di calcolo utilizzate: nel caso in esame, non interessa conoscere i valori di illuminamento su tutti i punti sulla superficie di calcolo dell'intera banchina, in quanto il valore d'illuminamento nell'angolo compreso fra banchina e parete laterale della galleria non apporta conoscenza utile.

Inoltre, includendo quest'area nella superficie di calcolo, ci sarebbe il rischio di sfalsare la prova per i bassi valori d'illuminamento della zona di intersezione. Per la geometria del sito, infatti, in quei punti del reticolo di calcolo, si ha un valore molto basso di illuminamento.

Questo valore basso ridurrebbe notevolmente il valore medio d'illuminamento E_m , quindi l'uniformità della superficie di calcolo.

Verrà quindi accorciata leggermente la SC a circa 1,8m ottenendo comunque una SC corretta e in linea con ciò che desideriamo valutare.

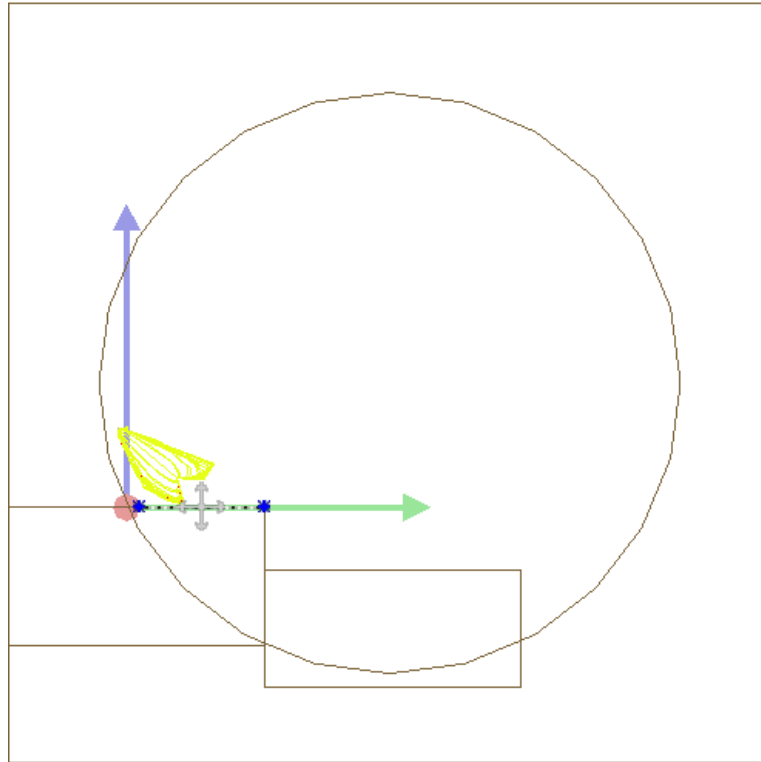


Fig.8.8 - Vista laterale SC Centrale banchina calpestio modello galleria funzionamento "normale"

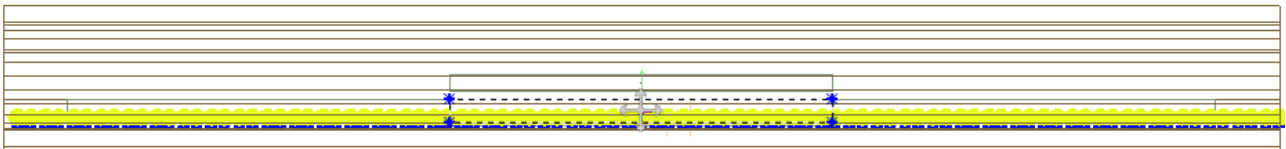


Fig.8.9 - Vista dall'alto SC Centrale banchina calpestio modello galleria funzionamento "normale"

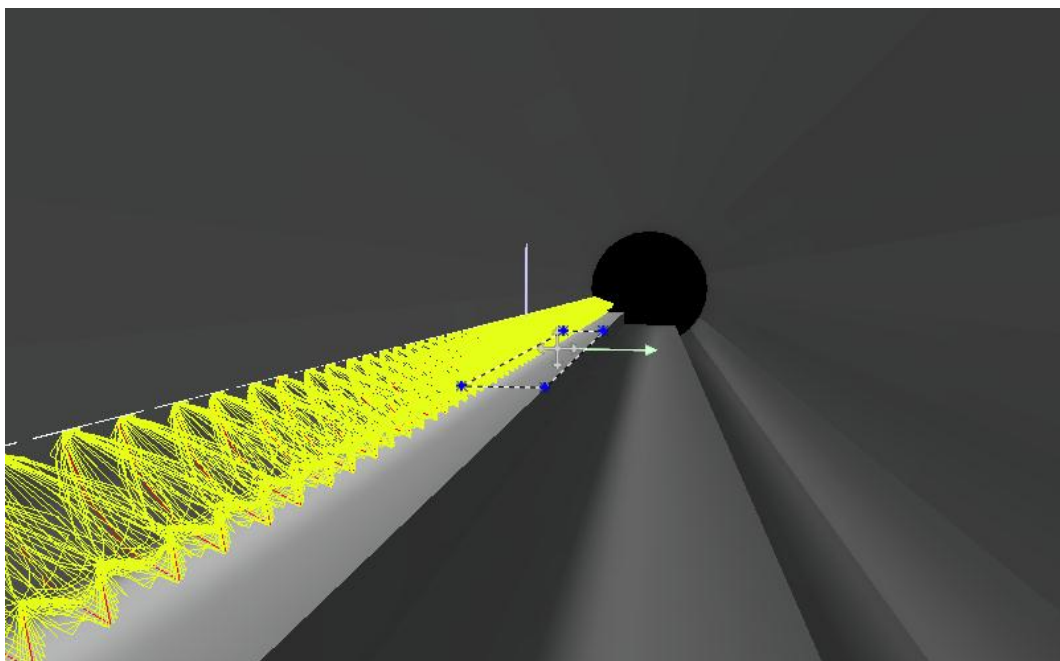
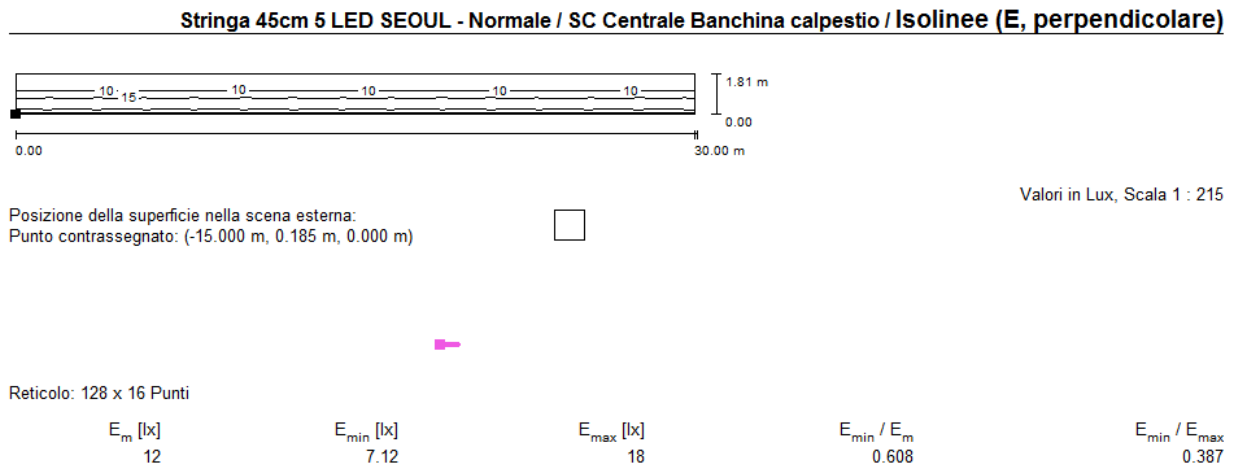


Fig.8.10 - Vista 3D SC Centrale banchina calpestio modello galleria funzionamento "normale"

I risultati ottenuti da questa superficie di calcolo sono i seguenti:



Il reticolo della superficie di calcolo di default viene impostato automaticamente dal software.

Emergono risultanti una buona uniformità di campo $E_{min}/E_{max} = 0,387lx$, un illuminamento massimo $E_{max} = 18lx$, uno minimo $E_{min}=7,12lx$ e uno medio $E_m = 12lx$.

Questi valori soddisfano abbondantemente i requisiti minimi imposti dalla normativa di 1lux minimo garantito a livello calpestio.

Si possono ottenere valori più dettagliati di illuminamento posti in punti specifici del reticolo di calcolo della SC.

Se ci si immagina posti in un punto centrale della SC si ottiene la *Tab.8.2*:

Tab. 8.2 - Tabella valori lux SC Centrale banchina calpestio galleria funzionamento "normale"

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.758 | 7.13 | 7.12 | 7.16 | 7.16 | 7.22 | 7.21 | 7.21 | 7.18 | 7.19 | 7.14 | 7.12 | 7.14 | 7.16 | 7.21 | 7.22 | 7.22 | 7.19 |
| 1.644 | 7.13 | 7.12 | 7.16 | 7.16 | 7.22 | 7.21 | 7.21 | 7.18 | 7.19 | 7.14 | 7.12 | 7.14 | 7.16 | 7.21 | 7.22 | 7.22 | 7.19 |
| 1.531 | 8.03 | 8.02 | 8.05 | 8.06 | 8.09 | 8.07 | 8.09 | 8.07 | 8.08 | 8.04 | 8.02 | 8.05 | 8.05 | 8.09 | 8.07 | 8.07 | 8.07 |
| 1.418 | 8.03 | 8.02 | 8.05 | 8.06 | 8.09 | 8.07 | 8.09 | 8.07 | 8.08 | 8.04 | 8.02 | 8.05 | 8.05 | 8.09 | 8.07 | 8.07 | 8.07 |
| 1.304 | 8.75 | 8.75 | 8.72 | 8.79 | 8.81 | 8.80 | 8.78 | 8.78 | 8.73 | 8.76 | 8.74 | 8.74 | 8.77 | 8.74 | 8.78 | 8.77 | 8.80 |
| 1.191 | 8.92 | 8.93 | 9.00 | 9.03 | 9.05 | 9.06 | 9.02 | 9.01 | 9.00 | 8.97 | 8.94 | 9.00 | 8.97 | 9.01 | 9.08 | 9.07 | 9.07 |
| 1.077 | 9.23 | 9.25 | 9.30 | 9.34 | 9.37 | 9.37 | 9.38 | 9.31 | 9.30 | 9.30 | 9.26 | 9.28 | 9.26 | 9.35 | 9.37 | 9.37 | 9.38 |
| 0.964 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 0.851 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| 0.737 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 0.624 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| 0.510 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 0.397 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 18 | 17 | 17 | 17 |
| 0.284 | 16 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 16 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| 0.170 | 13 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| 0.057 | 7.65 | 7.63 | 7.81 | 8.00 | 8.01 | 8.21 | 7.98 | 7.96 | 7.87 | 7.66 | 7.68 | 7.70 | 7.87 | 8.00 | 8.13 | 8.16 | 8.03 |
| m | 13.242 | 13.477 | 13.711 | 13.945 | 14.180 | 14.414 | 14.648 | 14.883 | 15.117 | 15.352 | 15.586 | 15.820 | 16.055 | 16.289 | 16.523 | 16.758 | 16.992 |

Si apre una piccola parentesi a riguardo di questa medesima situazione e superficie di calcolo: si è simulato l'attuale sistema di illuminazione delle gallerie ferroviarie italiane che utilizza apparecchi illuminanti formati da lampade fluorescenti compatte da 18W distanziati 15m e installati ad un'altezza di 2.30m dal piano di calpestio.

Si è notato che il sistema tradizionale rasenta i valori minimi di illuminamento dettati dalla norma, in quanto presenta un illuminamento minimo di $E_{MIN}=1,25lx$ e in quanto risulta avere un'uniformità luminosa molto critica per l'adattamento dell'occhio umano ($E_{MIN}/E_{MAX}=0,089$).

Quest'ultimo valore risulta essere svantaggioso in una condizione di esodo in emergenza.

Da qui la necessità di proporre una soluzione alternativa.

Nel caso di *SC Centrale banchina* $h=1m$, si tratta di rialzare la superficie di calcolo precedente ad un'altezza di un metro dal piano di calpestio. Tuttavia, considerando la curvatura delle pareti della galleria, si è reputato opportuno aumentare leggermente l'area della SC: rispetto al caso precedente è stata allargata l'area mantenendo inalterata la lunghezza ($30 \times 2m^2$).

Per comprendere al meglio il posizionamento della SC in questione si riporta la *Fig.8.11*:

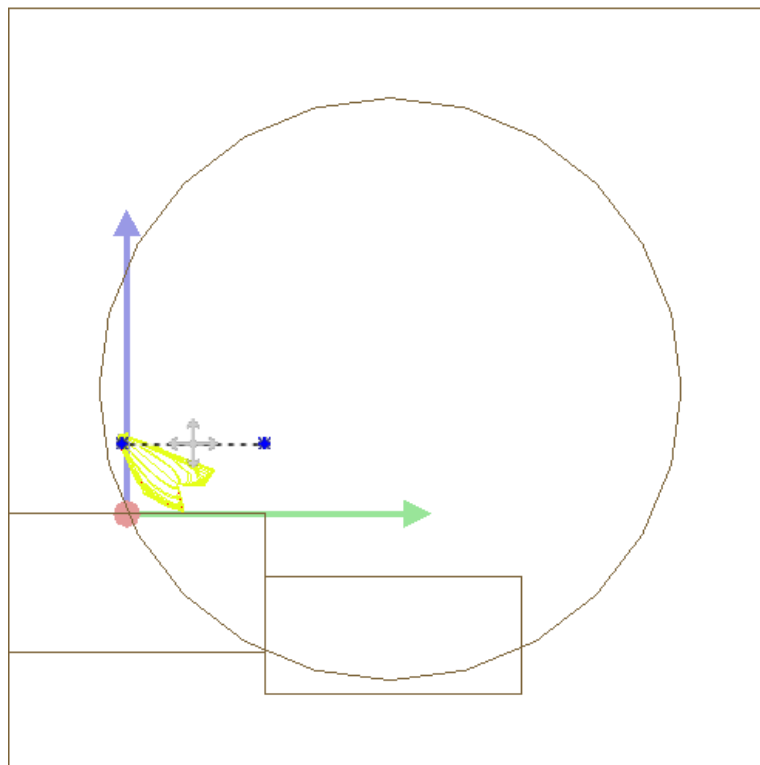
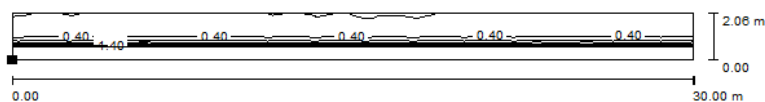


Fig.8.11 - Vista laterale SC Centrale banchina $h=1m$ modello galleria funzionamento "normale"

Lo scopo di questa SC è valutare l'illuminamento medio presente ad un'altezza di 1m dalla banchina, verificando se questo adempie ai requisiti normativi di 5 lux medi.

Stringa 45cm 5 LED SEOUL - Normale / SC Centrale Banchina h=1 m / Isolinee (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 215

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (-15.000 m, -0.063 m,
1.000 m)



Reticolo: 128 x 32 Punti

E_m [lx]
13

E_{min} [lx]
0.19

E_{max} [lx]
164

E_{min} / E_m
0.015

E_{min} / E_{max}
0.001

Dalle isolinee si nota che, questa volta, il livello di illuminamento non è ben distribuito nell'area, come anche conferma il valore di uniformità molto basso.

Tuttavia, non essendoci norme che regolarizzano il livello di uniformità ad un'altezza di 1m dal piano di calpestio lo reputiamo un dato basso ma accettabile.

Ci si concentra sul valore medio: rispetto ai 5 lx medi richiesti dalla normativa, i 13lx che si incontrano rispondono pienamente a ciò che è desiderato.

Attraverso queste due simulazioni si è in grado di affermare l'idoneità dell'apparecchio illuminante allo scopo prefissato.

Per osservare l'illuminamento e l'uniformità su un'area maggiore delle precedenti ed avere quindi un'idea d'insieme dell'illuminazione ottenuta, si prosegue con una simulazione su una SC Estesa di profondità 90m e larghezza 1,8m sulla banchina posta a livello calpestio (SC Estesa banchina calpestio).

Moduli 45cm 5 LED SEOUL - Normale / SC Estesa Banchina calpestio / Isolinee (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 644

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (-45.000 m, 0.185 m,
0.000 m)



Reticolo: 128 x 32 Punti

E_m [lx]
12

E_{min} [lx]
6.95

E_{max} [lx]
18

E_{min} / E_m
0.594

E_{min} / E_{max}
0.379

Notiamo che i valori di illuminamento e omogeneità ottenuti sono perfettamente in linea con quelli elaborati precedentemente nel caso della SC Centrale banchina calpestio.

Pur non essendo richieste ulteriori prescrizioni dalla normativa, sono state effettuate altre simulazioni di carattere puramente sperimentale, per valutare i vantaggi e i limiti di questo nuovo tipo di installazione.

Abbiamo verificato tramite una superficie verticale l'illuminamento presente al centro del modello galleria; SC Centrale banchina verticale, ci mostra i valori ottenuti su una superficie $1,90 \times 1,90 \text{m}^2$ posta verticalmente al centro della galleria come specificato nei prospetti (Fig.8.12; Fig.8.13).

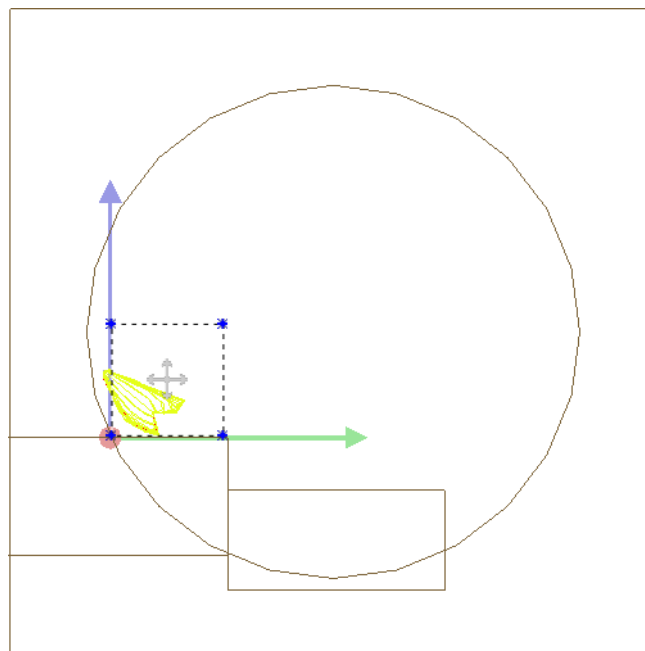


Fig.8.12 - Vista laterale SC Centrale banchina verticale modello galleria funzionamento "normale"

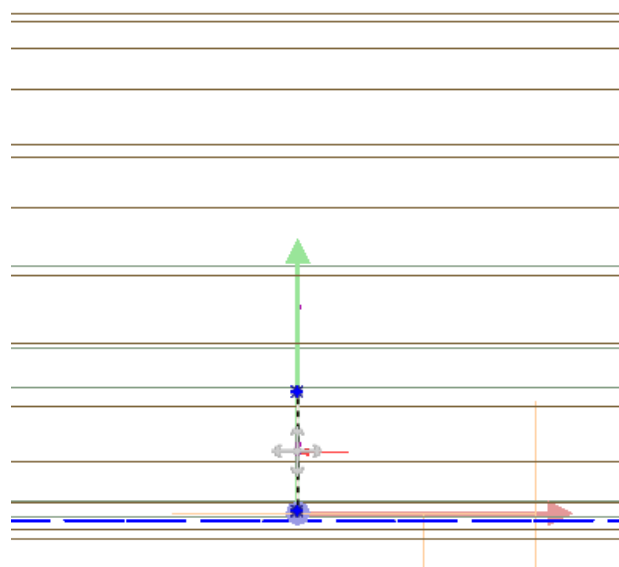
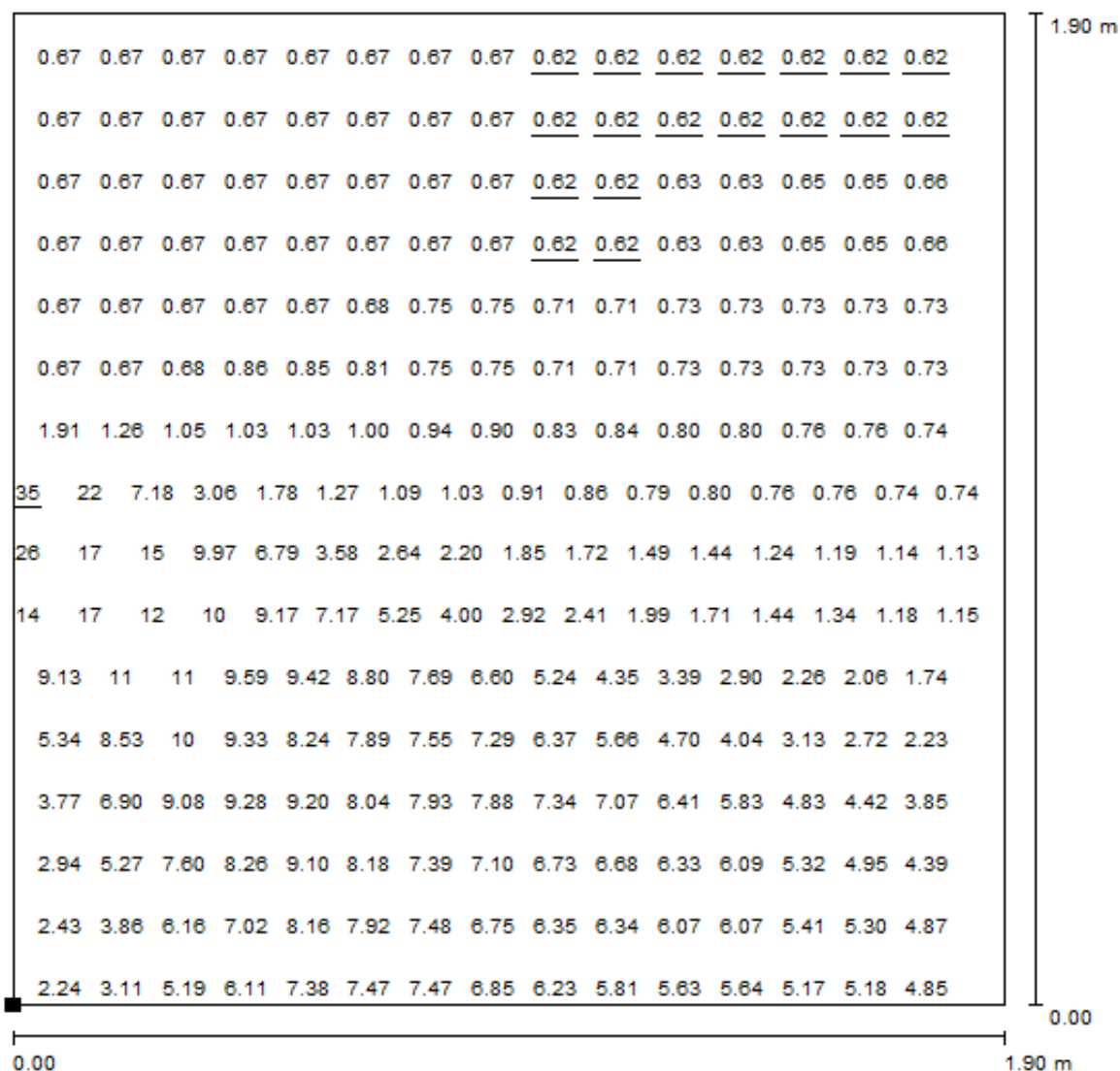


Fig.8.13 - Vista dall'alto SC Centrale banchina verticale modello galleria funzionamento "normale"

Ciò che è emerso dal report è il seguente:

Tab. 8.3 - Tabella valori lux SC Centrale banchina verticale galleria funzionamento "normale"



Lo scopo di questa prova è quella di valutare l'illuminamento che si presenterebbe all'altezza visiva di una persona. Immaginando una persona di statura media 1,75m al centro della banchina, all'altezza visiva si presenterebbe un illuminamento di appena $0,6 \div 0,7lx$. Questo valore molto basso, permetterebbe comunque una minima visibilità, ma potrebbe essere migliorabile per creare un comfort visivo e soprattutto evitare una sensazione di panico alle persone esodanti.

Sempre immaginando una situazione di esodo del personale viaggiante, ci si è chiesti se oltre il punto limite della banchina, il livello di illuminazione sarebbe sufficiente per capire la conformazione dello spazio circostante; si è quindi effettuata un'ulteriore prova con una superficie di calcolo posizionata ad un'altezza di 60cm dalla piattaforma, in assenza del convoglio (SC Centrale piattaforma) di area $30 \times 1,3m^2$ (Fig.8.14; Fig.8.15).

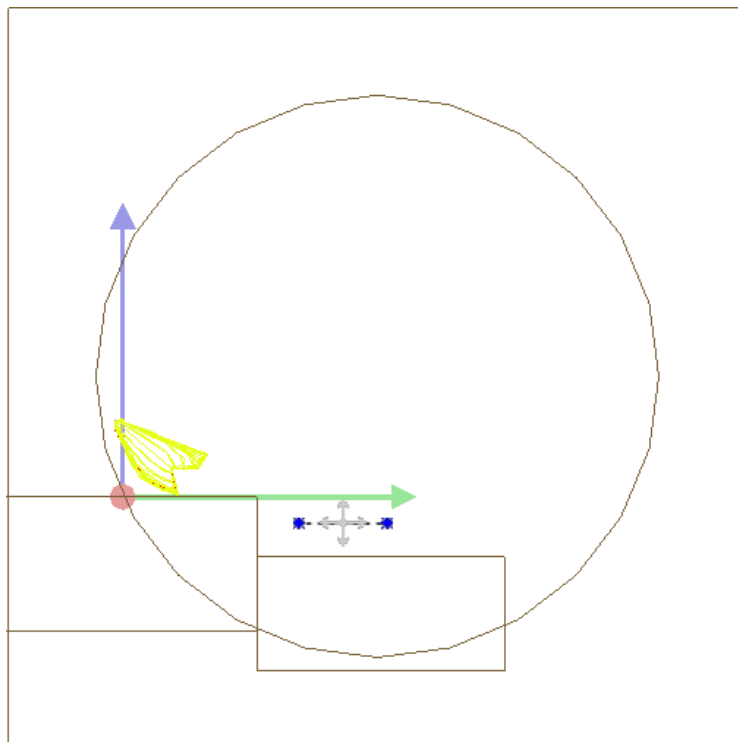


Fig.8.14 - Vista laterale SC Centrale piattaforma modello galleria funzionamento "normale"

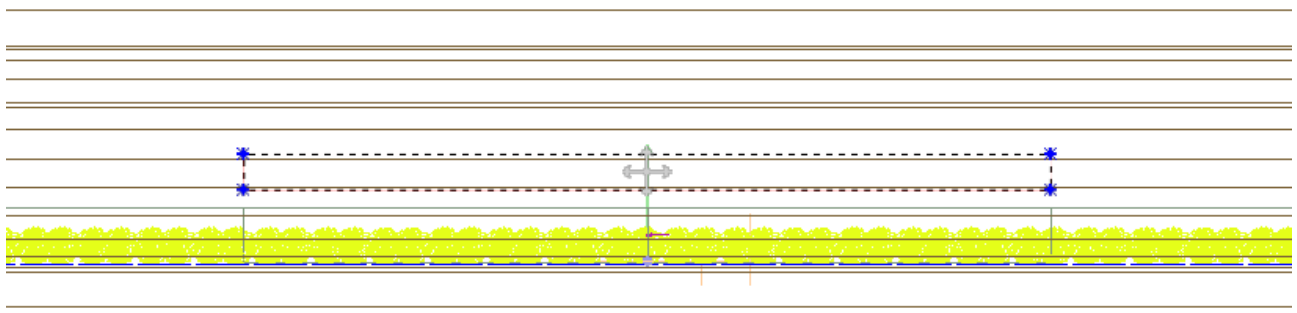
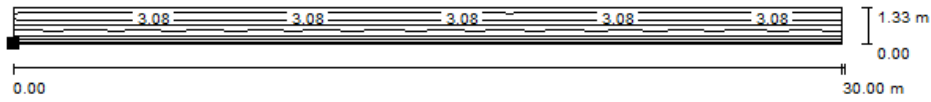


Fig.8.15 - Vista dall'alto SC Centrale piattaforma modello galleria funzionamento "normale"

Ottenendo un report con valori eccellenti di visibilità:

**1m di apparecchio Ill. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Normale / SC Centrale
Piattaforma / Isolinee (E, perpendicolare)**



Valori in Lux, Scala 1 : 215

Posizione della superficie nella scena
esterna:
Punto contrassegnato: (-15.000 m, 2.637 m,
-0.400 m)



Reticolo: 128 x 8 Punti

| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 3.32 | 2.38 | 4.57 | 0.717 | 0.522 |

8.2.3 Funzionamento “normale con persone esodanti”

Pur non essendo una simulazione strettamente necessaria per definire i valori di illuminamento richiesto, sono state eseguite delle prove su delle superfici di calcolo comprendenti volumi di persone esodanti.

Sulla banchina, al centro del modello galleria, sono state considerate 10 file da 2 persone, distanziate circa 40cm le una dalle altre, occupanti una superficie totale di 7,5m di lunghezza e 1,20 di larghezza. Le sagome delle persone esodanti, sono state considerate con un effetto riflessione del 10%, la statura considerata è quella di una persona di corporatura media di 1,75m di altezza (vedi vista 3D Fig.8.16).

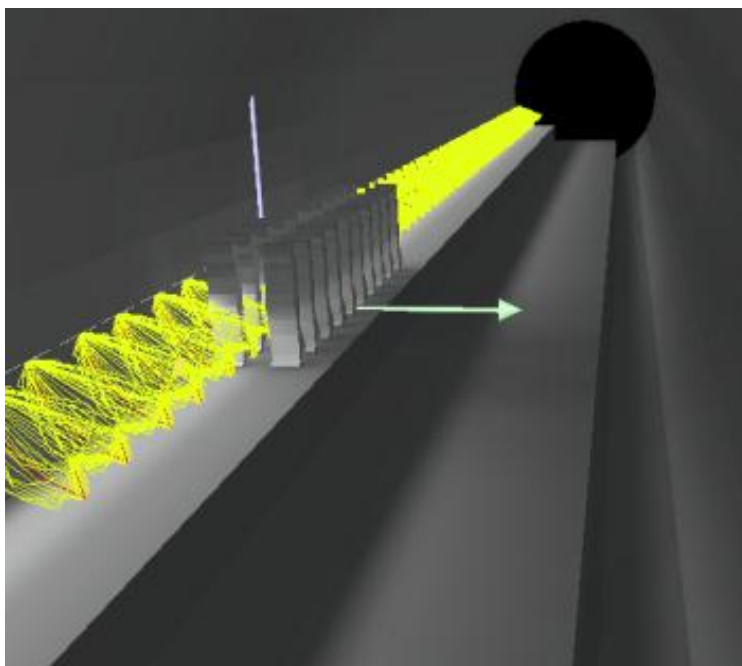


Fig.8.16 - Vista 3D illuminazione modello galleria funzionamento “normale con persone esodanti”

Come nei casi precedenti sono state considerate differenti superfici di calcolo in base alle esigenze:

- SC Centrale banchina calpestio;
- SC Centrale persone calpestio;
- SC Centrale banchina h=1m;
- SC Centrale persone h=1m;
- SC Centrale banchina verticale;
- SC Centrale piattaforma.

Per la SC Centrale banchina calpestio, comprendente 4 file da 2 persone, posta al piano di calpestio occupa un'area di $3 \times 1,8 \text{m}^2$ (Fig.8.17 e Fig.8.18). Lo scopo del posizionamento di questa SC è quello di andare a verificare l'illuminamento presente sul marciapiede “affollato” di personale esodante.

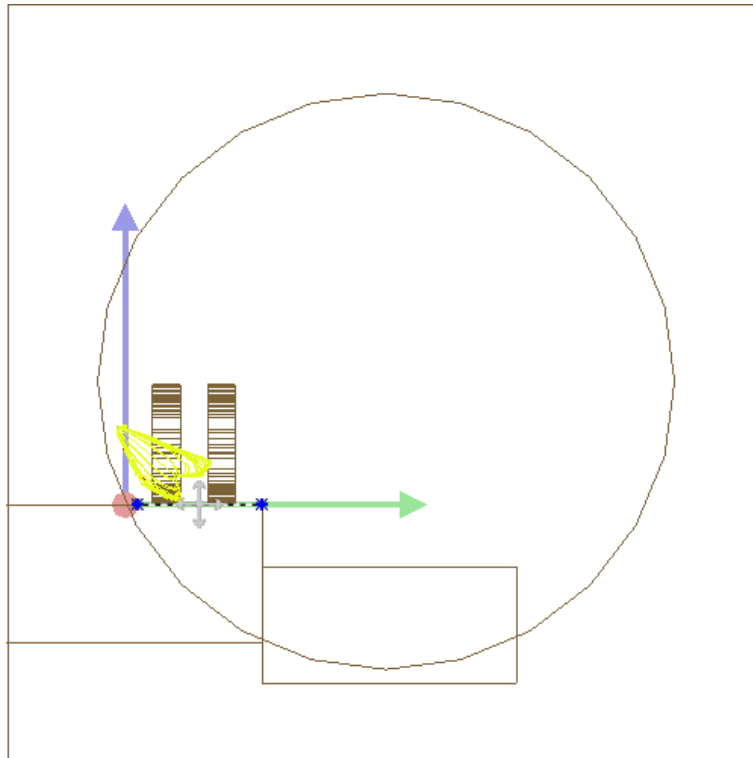


Fig.8.17 - Vista laterale SC Centrale banchina calpestio modello galleria funzionamento "normale con persone esodanti"

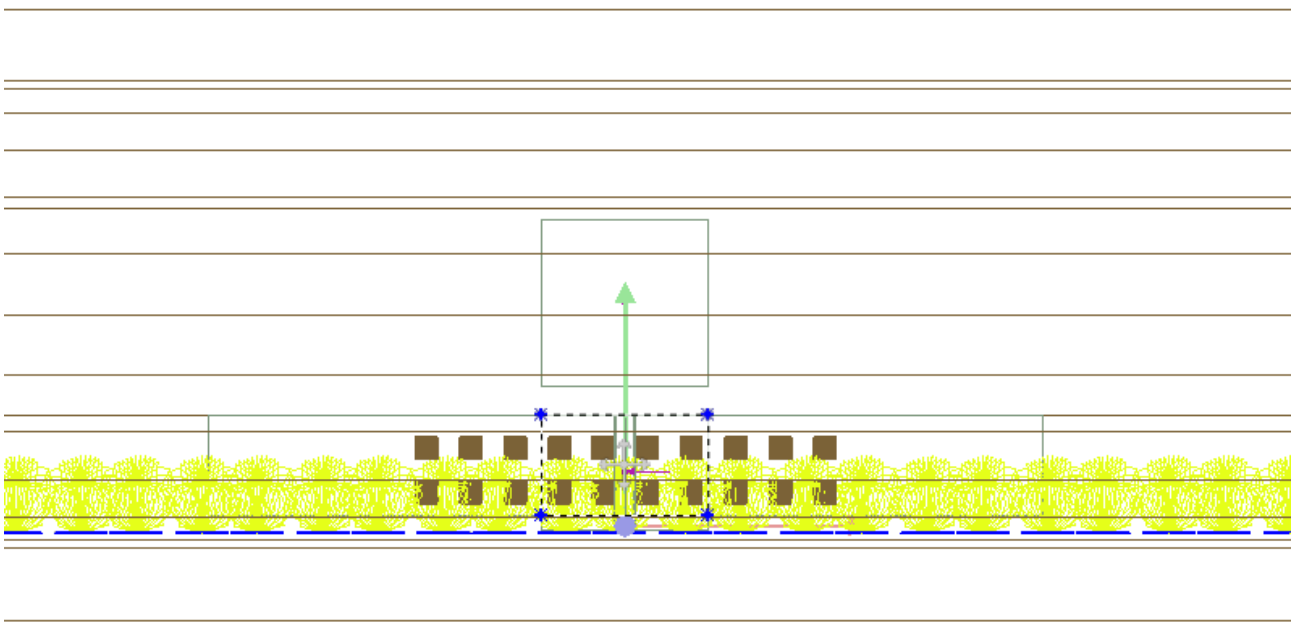
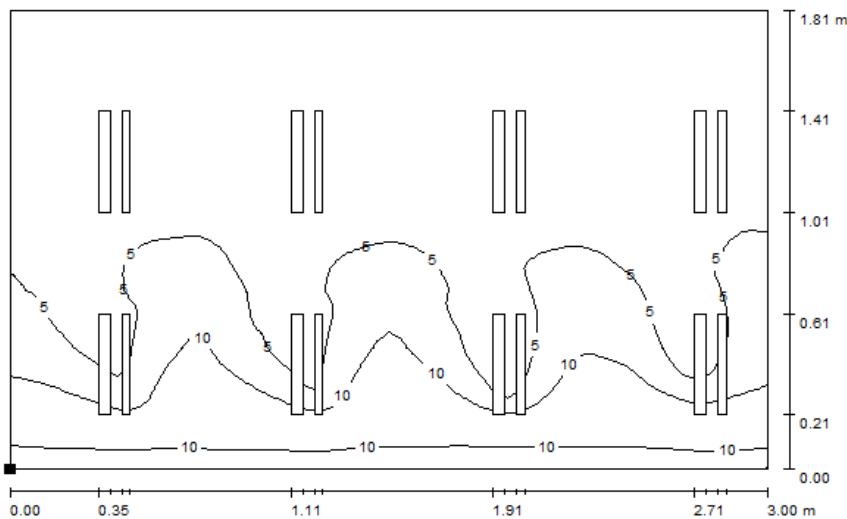


Fig.8.18 - Vista dall'alto SC Centrale banchina calpestio modello galleria funzionamento "normale con persone esodanti"

Risultati del report:

1m di apparecchio III. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Persone / SC Centrale Banchina calpestio / Isolinee (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 22

Posizione della superficie nella scena esterna:
 Punto contrassegnato: (-1.500 m, 0.185 m,
 0.000 m)



Reticolo: 64 x 64 Punti

| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 5.28 | 0.41 | 16 | 0.078 | 0.025 |

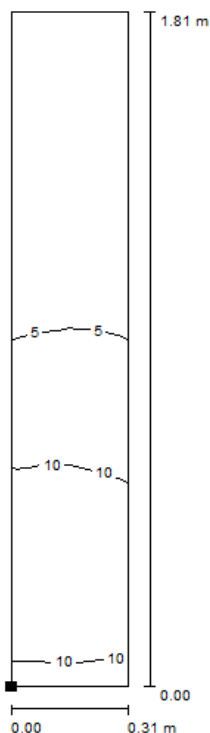
Da un'analisi dei risultati si può osservare che si ha una grande disuniformità d'illuminamento, questo comporta una grande differenza tra il valore massimo d'illuminamento e quello minimo.

Pur non essendo un caso dettato dalla normativa (non parla di valutazione dell'illuminamento minimo con volumi d'ingombro quali persone esodanti) piacerebbe, ad ogni modo, che questo valore fosse superiore al limite imposto dalla norma di 1 lux minimo.

Il non raggiungimento di questo valore si può giustificare affermando (vedi in allegato tabella valori illuminamento reticolo) che i valori più bassi di illuminamento si trovano in prossimità dei volumi occupanti le superfici della banchina; ossia in prossimità dei piedi delle persone esodanti.

Si farà, dunque, un'altra superficie di calcolo più dettagliata (*SC Centrale persone calpestio*, vedi Allegato E), comprendente l'interdistanza marginale fra una fila e l'altra, per andare a valutare l'illuminamento sulla banchina che ciascuna persona avrebbe dinanzi a sé.

1m di apparecchio III. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Persone / SC Centrale Persone calpestio / Isolinee (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 15

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (-0.157 m, 0.186 m, 0.000 m)



Reticolo: 4 x 16 Punti

| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 7.04 | 2.05 | 16 | 0.291 | 0.124 |

In questo caso, come si può notare, definendo una SC di area $0,31 \times 1,81 \text{m}^2$, quindi di lunghezza appena 9cm minore della reale interdistanza fra le file di persone, il valore minimo E_{min} cresce, raggiungendo valori soddisfacenti.

Un altro caso di interesse è quello di una superficie di calcolo posta ad una altezza di un metro (SC Centrale banchina $h=1\text{m}$); si vuole quindi verificare se, anche il presenza dei volumi delle persone in esodo, è garantito un illuminamento medio E_m di 5 lx.

La superficie di calcolo, è quindi posizionata ad una altezza di 1 metro dal piano di calpestio e presenta un'area di $3 \times 2 \text{m}^2$ (leggermente più larga dell'area precedente "SC Centrale persone calpestio", poiché consideriamo la curvatura della parete della galleria, Fig.8.19).

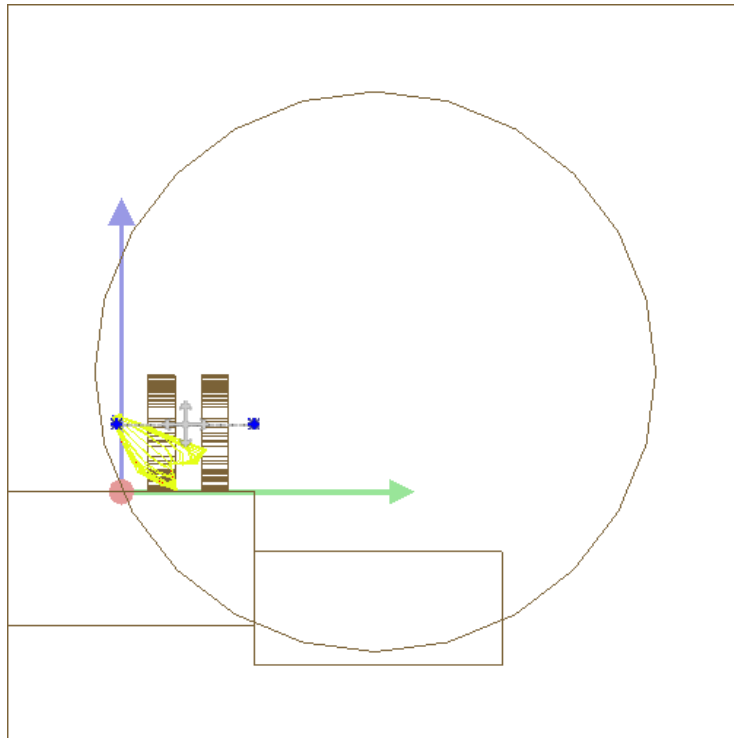


Fig.8.19 - Vista laterale SC Centrale banchina $h=1m$ modello galleria funzionamento "normale con persone esodanti"

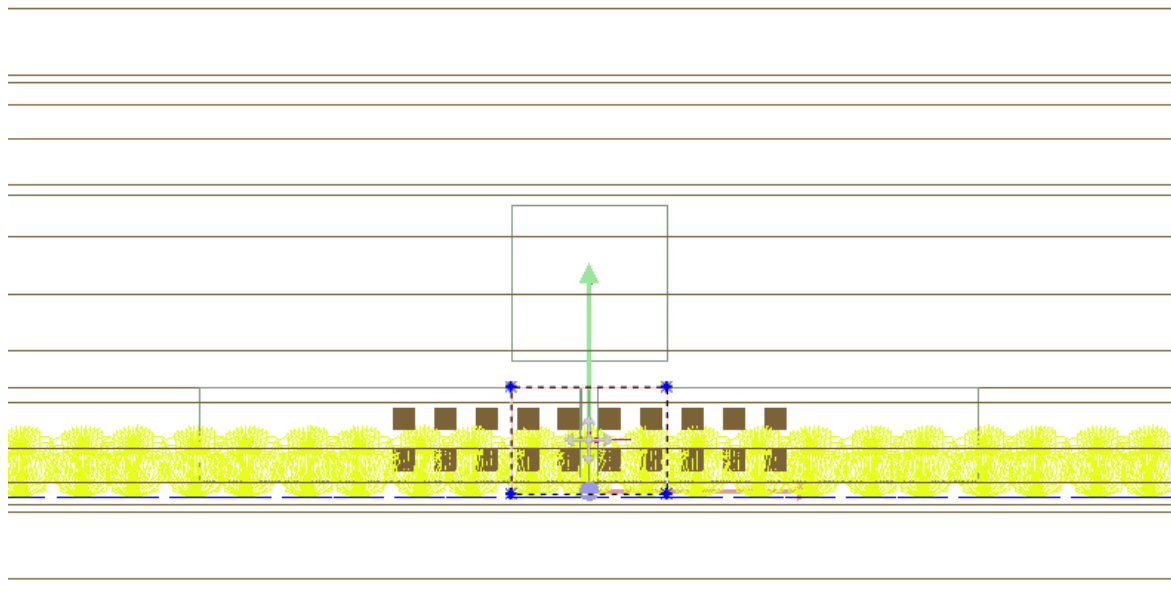


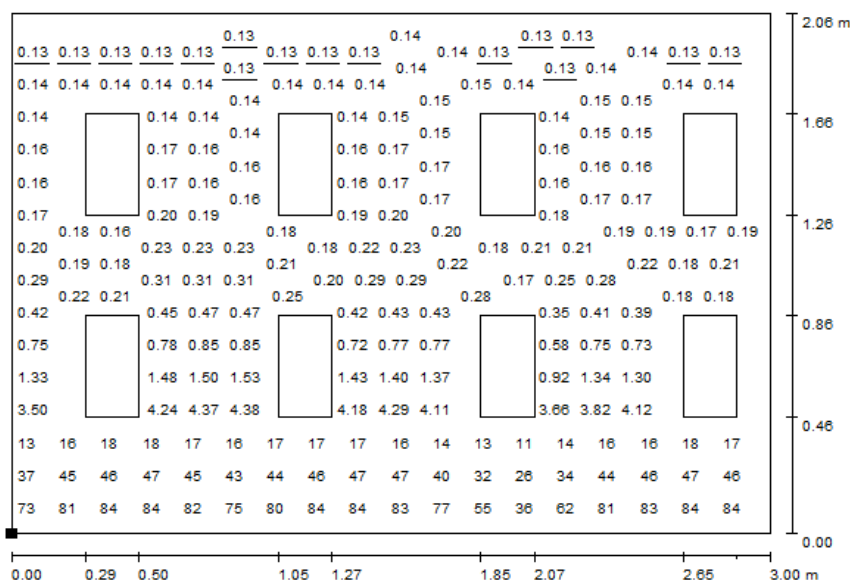
Fig.8.20 - Vista dall'alto SC Centrale banchina $h=1m$ modello galleria funzionamento "normale con persone esodanti"

I risultati ottenuti, dal punto di vista qualitativo non sono ottimi, anche in questo caso si vede l'esigenza di fornire un eventuale illuminazione rischiarante per creare un maggior comfort visivo. I bassi valori di illuminazione ottenuti su questa SC, da un certo punto di vista, sono prevedibili: essendo il corrimano installato ad un'altezza di 1,15 dal piano di calpestio è evidente che

L'uniformità misurata su un piano posto ad un metro dal piano di calpestio non darà ottimi risultati, soprattutto con l'aggiunta di volumi nello spazio di misurazione.

Tuttavia, limitandoci a quanto prescrivono le norme, il valore di illuminamento medio E_m è garantito abbondantemente, essendo superiore a 5lx medi.

**1m di apparecchio III. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Persone / SC Centrale Banchina
h=1 m / Grafica dei valori (E, perpendicolare)**



Valori in Lux, Scala 1 : 22

Impossibile visualizzare tutti i valori calcolati.

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (-1.500 m, -0.063 m,
1.000 m)



Reticolo: 128 x 32 Punti

| | | | | |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
| 14 | 0.13 | 166 | 0.009 | 0.001 |

Per la simulazione eseguita su una superficie di calcolo posta, sempre ad una altezza di 1 metro, ma collocata nell'interspazio fra due file si rimanda all'appendice (vedi *Allegato E; SC Centrale persone h=1m*).

Come nel caso di funzionamento normale, sono state provate altre due superfici di calcolo; una posta su un piano verticale (*SC Centrale banchina verticale*) e una posta su un piano a -40cm dal piano di calpestio in prossimità della piattaforma (*SC Centrale piattaforma*). I risultati ottenuti sono in linea con le aspettative. Nel caso di SC verticale, i dati risultanti sono comparabili con la SC vista nel caso di funzionamento normale. Nel caso di SC in prossimità della piattaforma i dati risultanti sono notevolmente più bassi rispetto quelli ottenuti nel caso di funzionamento normale. Ciò è ragionevole poiché i volumi delle persone, impediscono, limitatamente a dove sono situate, un buon illuminamento della piattaforma.

Tuttavia questo aspetto negativo non risulta di particolare limitazione ai fini normativi e della bontà dell'illuminazione. In *Allegato E* si trovano i report delle suddette prove eseguite.

Da ciò che si è finora visto e analizzato dai report delle superfici di calcolo, si può concludere che l'apparecchio rispecchia le aspettative di buon funzionamento ed è perfettamente idoneo e congruente alla normative dei DM e STI. Tuttavia, come si è già accennato, l'installazione potrebbe essere migliorabile dal punto di vista del comfort visivo: senza dimenticare che questo tipo di installazione illuminotecnica è un'illuminazione di sicurezza nell'ambito di gallerie ferroviarie, e che quindi è prevista funzionante solamente in caso di esodo di persone dovuto a disservizi al materiale rotabile.

Quindi in una situazione di "emergenza" e di potenziale "panico", i lux incontrati dall'altezza del metro in su, come abbiamo visto, risultano essere molto esigui.

Si potrebbe integrare quindi al corrimano un apparecchio illuminante che rischiarasse l'ambiente, quindi la volta della galleria, creando così una luce diffusa e una minore sensazione di "buio" ad altezza visiva.

8.2.4 Funzionamento in caso di “guasto di un metro di corrimano illuminante”

Un caso di particolare importanza è quello di verificare in occasione di un guasto ad un apparecchio come si distribuisce l’illuminamento nell’ambiente circostante al disservizio.

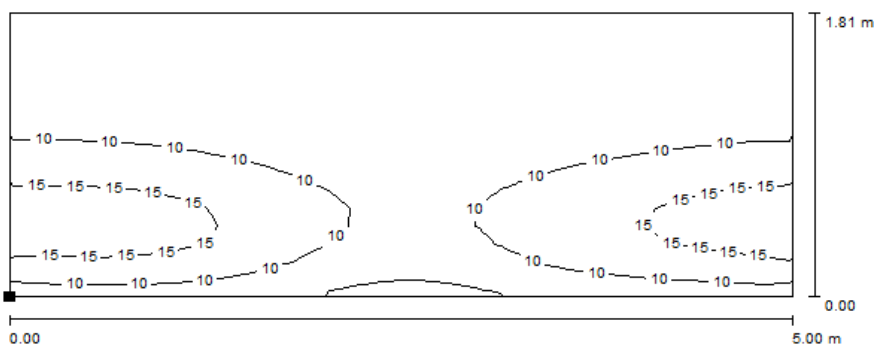
Con l’attuale impianto d’illuminazione (vedi anche *schema (0), Allegato D*), un guasto ad un apparecchio, arrecava una zona “buia” di circa 30m di lunghezza.

Nel sistema che si sta studiando, nel corrimano, si può presentare un guasto ad un LED. In conseguenza a ciò verrebbe a spegnersi tutta la relativa stringa da 45cm, ma non quella successiva né quella precedente (questo per come avvengono i collegamenti fra stringhe e per come sono fatti i circuiti stampati).

In base questo, il massimo disservizio causato dalla rottura di un LED, è quello tale da provocare una zona di “buio” di soli 45 cm. Il disservizio in questione è considerato completamente irrisorio.

Tuttavia si è simulato una situazione di guasto nelle peggiori delle ipotesi: considerando una rottura avvenuta in due LED appartenenti a due stringhe attigue. In questo caso il disservizio risultante è di un metro di corrimano illuminante.

Per una SC Centrale banchina calpestio, centrata sul metro di apparecchio in disservizio, si ha il report seguente:



Valori in Lux, Scala 1 : 36

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (0.660 m, 0.185 m,
0.000 m)



Reticolo: 128 x 16 Punti

E_m [lx]
9.33

E_{min} [lx]
3.62

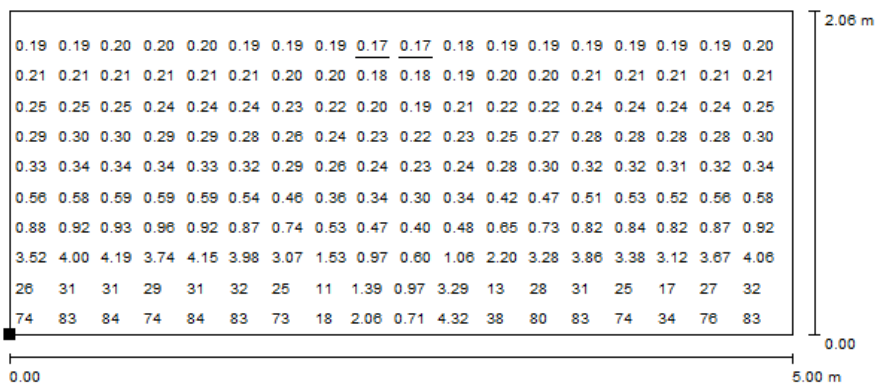
E_{max} [lx]
18

E_{min} / E_m
0.388

E_{min} / E_{max}
0.205

Notasi che rispetto all’analogia SC del caso di funzionamento normale, si ha circa un dimezzamento dell’uniformità. Tuttavia i risultati riscontrati non deludono, poiché si mantiene un buon livello di illuminamento minimo E_{min} e illuminamento medio E_m .

Circa la SC Centrale banchina $h=1m$ posta ad altezza un metro dal piano di calpestio e centrata sull’apparecchio in disservizio si hanno i seguenti valori:



Valori in Lux, Scala 1 : 36

Impossibile visualizzare tutti i valori calcolati.

Posizione della superficie nella scena esterna:
 Punto contrassegnato: (0.660 m, -0.063 m, 1.000 m)



Reticolo: 128 x 32 Punti

| | | | | |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
| 9.63 | 0.17 | 166 | 0.018 | 0.001 |

Si osserva che i valori non si discostano molto dall’analoga SC nel caso di funzionamento normale; è rilevante solo un abbassamento di qualche lux nel valore medio E_m .

Dalle altre prove effettuate, risulta ininfluenza il disservizio anche sulle superfici di calcolo verticali e sulla piattaforma.

Per la SC Centrale banchina verticale sono state analizzate diverse superfici posizionate in differenti punti; uno centrato sul metro di apparecchio guasto, uno in prossimità dell’inizio e uno in prossimità della fine. In tutti e tre i casi si osserva un illuminamento ad altezza visiva di $0,5 \div 0,6$ lux, non discostandosi di molto dai casi precedentemente visti.

Per quanto riguarda la SC Centrale piattaforma, anche con un metro di apparecchio non funzionante, si ha in prossimità di questo, sulla piattaforma, un buon livello di illuminamento medio ($E_m = 2,81$ lux) e uniformità.

Dato i buoni risultati ottenuti anche con un metro di apparecchio illuminante fuori uso, si potrebbe pensare in eventuale ulteriore modifica del sistema illuminotecnico dimezzando gli apparecchi (ipotesi presa in considerazione anche nei §9 e §10): nel prossimo sotto paragrafo si andranno quindi ad effettuare delle prove nel modello galleria, con un metro di corrimano illuminato e un metro di corrimano cieco.

Questo sistema lo chiameremo “funzionamento normale/economico”; esso rispecchiando la situazione realizzativa di un corrimano formato da moduli di due metri, ma costituiti al loro interno solo da un metro di stringhe LED.

La situazione è esemplificata da una riduzione al 50% degli apparecchi illuminanti (Fig.8.21).

8.2.5 Funzionamento “normale/economico” dell’illuminazione di sicurezza

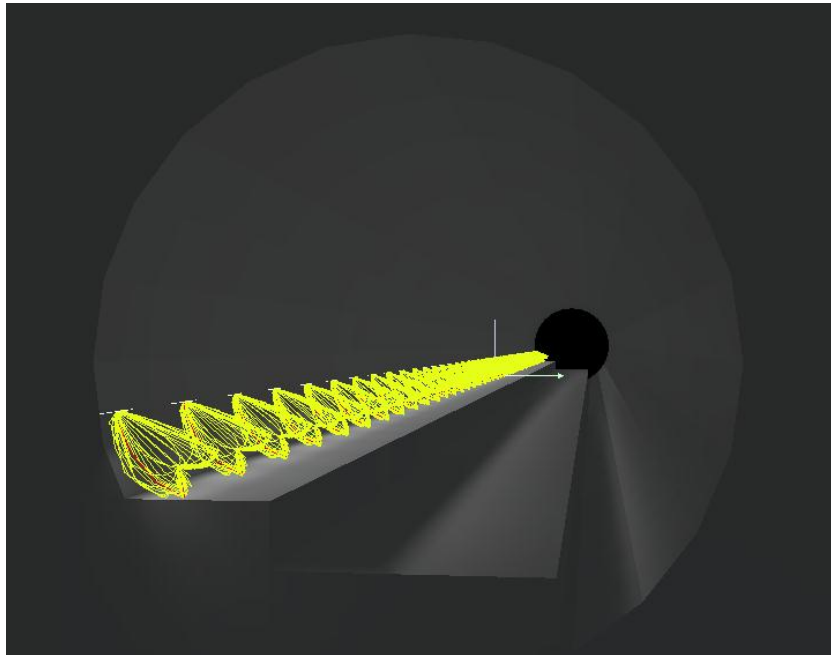


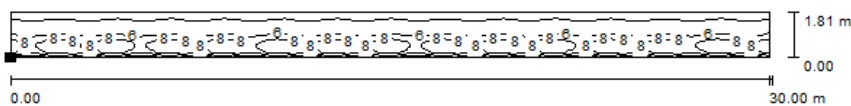
Fig.8.21 - Vista 3D illuminazione modello galleria funzionamento “normale/economico”

Dimezzando il numero di apparecchi illuminanti si avrà una soluzione sicuramente meno uniforme, ed un illuminazione meno continua, ma con dei vantaggi economici, risparmio materiale e risparmio energetico.

Per vedere se questa soluzione “economica” è competitiva, se quindi il compromesso tra risparmio e perdita di uniformità è realizzabile, sono state eseguite le stesse prove con le medesime superfici di calcolo usate nel caso primo di funzionamento normale.

SC Centrale banchina calpestio

1m di apparecchio Ill. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Normale/economica / SC Centrale Banchina calpestio / Isolinee (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 215

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (-15.000 m, 0.185 m, 0.000 m)



Reticolo: 128 x 16 Punti

E_m [lx]
5.85

E_{min} [lx]
3.03

E_{max} [lx]
10

E_{min} / E_m
0.518

E_{min} / E_{max}
0.300

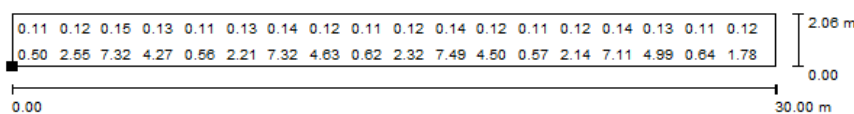
Come immaginabile, il valore di uniformità è diminuito, bisognerà valutare successivamente se il dimezzamento di apparecchi vale l'abbassamento da $E_{\min}/E_{\max} = 0,387$ a $E_{\min}/E_{\max} = 0,3$.

La soluzione risulta accettabile anche dal punto di vista normativo, poiché il valore di illuminamento minimo si mantiene superiore ad 1 lux richiesto.

Il valore di illuminamento medio, sulla SC posta ad altezza uguale ad un metro dal piano di calpestio, cala, mantenendosi comunque ad un valore soddisfacente.

SC Centrale banchina h=1m

1m di apparecchio Ill. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Normale/economica / SC Centrale Banchina h=1 m / Grafica dei valori (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 215

Impossibile visualizzare tutti i valori calcolati.

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (-15.000 m, -0.063 m, 1.000 m)



Reticolo: 128 x 32 Punti

| E_m [lx] | E_{\min} [lx] | E_{\max} [lx] | E_{\min} / E_m | E_{\min} / E_{\max} |
|------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| 6.30 | 0.09 | 164 | 0.014 | 0.001 |

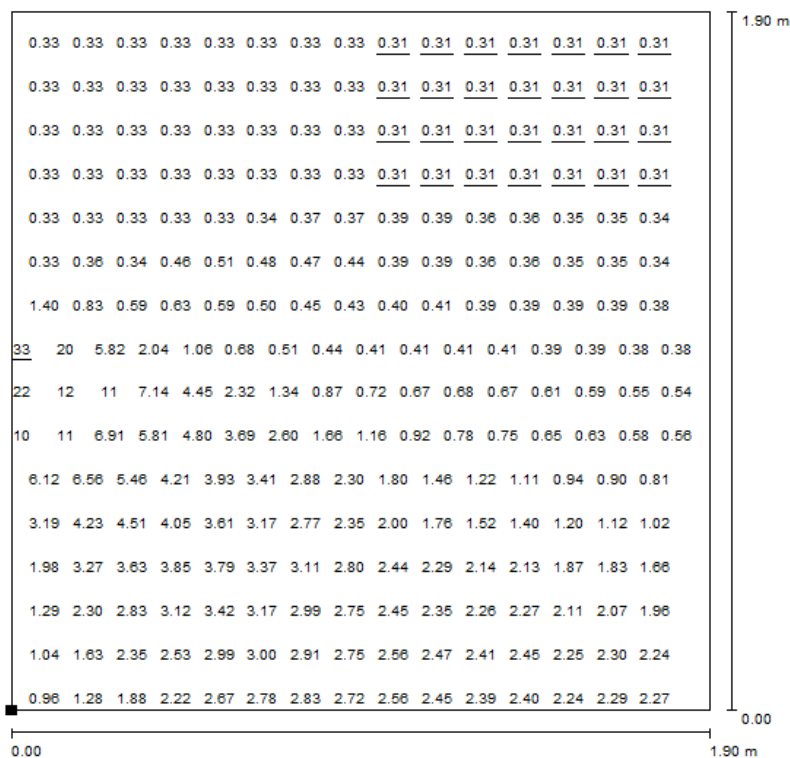
Da questi risultati si considera principalmente il dato del valore medio, assicurandoci che questo risulti maggiore di 5 lux medi.

Il resto dei dati sono costituiti da un bassissimo valore di uniformità, come si era già constatato in tutti i casi precedenti, dove era già stata partorita l'idea di aggiungere un'eventuale apparecchio che rischiarisse l'ambiente al di sopra del metro, migliorandomi l'uniformità.

Gli ultimi due casi che si andranno a simulare sono quelli di una SC verticale sulla banchina e una SC in prossimità della piattaforma.

SC Centrale banchina verticale

1m di apparecchio Ill. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Normale/economica / SC Centrale Banchina verticale / Grafica dei valori (E, perpendicolare)



Valori in Lux, Scala 1 : 15

Impossibile visualizzare tutti i valori calcolati.

Posizione della superficie nella scena esterna:
 Punto contrassegnato: (0.000 m, 0.030 m, 0.030 m)



Reticolo: 32 x 32 Punti

E_m [lx]
1.75

E_{min} [lx]
0.31

E_{max} [lx]
33

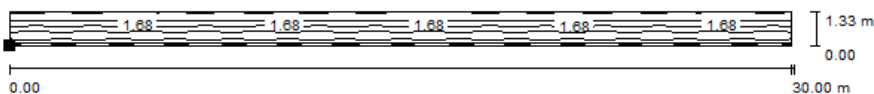
E_{min} / E_m
0.178

E_{min} / E_{max}
0.010

Anche in questo caso, si può generalizzare che i valori ottenuti risultano pressoché dimezzati.

SC Centrale piattaforma: anche in questa situazione la simulazione fornisce valori più bassi, ma reputabili in ogni caso accettabili. I valori ottenuti infatti indicano una buona uniformità e un illuminamento minimo maggiore di 1 lx.

**1m di apparecchio III. composto da: 2 stringhe da 45cm con 5 LED SEOUL - Normale/economica / SC Centrale
Piattaforma / Isolinee (E, perpendicolare)**



Valori in Lux, Scala 1 : 215

Posizione della superficie nella scena esterna:
Punto contrassegnato: (-15.000 m, 2.637 m, -
0.400 m)



Reticolo: 128 x 8 Punti

| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 1.67 | 1.14 | 2.36 | 0.685 | 0.483 |

Nel complesso si può concludere che se si è disposti ad avere:

- un'illuminazione meno performante;
- con valori più vicini ai limiti dettati dalla norma;
- un illuminazione leggermente meno uniforme.

A vantaggio di:

- un netto risparmio energetico;
- risparmio di materiale.

La soluzione appena analizzata potrebbe essere competitiva e presa in considerazione per una applicazione reale. Nei §9 e §10 se ne prenderà in considerazione per fornire un'alternativa economica ma funzionale al sistema di illuminazione tradizionale. Nei capitoli indicati, quindi, se ne descriverà l'installazione indicando l'eventuale schema elettrico previsto e computati i costi di materiale, esercizio e manutenzione comparati con il sistema innovativo "normale" (illuminato in modo continuo) e tradizionale.

8.2.6 Verifica attendibilità valori illuminamento

Un'ultima simulazione eseguita con il software Dialux è un calcolo di verifica.

Si vuole eseguire un controllo sull'effettività dei valori di illuminamento risultanti dai calcoli del software. Nell'impossibilità di andare a misurare fisicamente i valori di illuminamento, con uno strumento quale un luxmetro, all'interno di una galleria di tali dimensioni e con una siffatta sistemazione degli apparecchi illuminanti, per riscontrarne la veridicità, abbiamo pensato ad un metodo empirico di verifica.

Nel software Dialux, posizionando in un ambiente totalmente non riflettente un metro di apparecchio illuminante, ad una altezza di 2 metri, si andrà ad eseguire una misurazione d'illuminamento su una superficie di calcolo orizzontale di dimensioni $1 \times 1 \text{m}^2$.

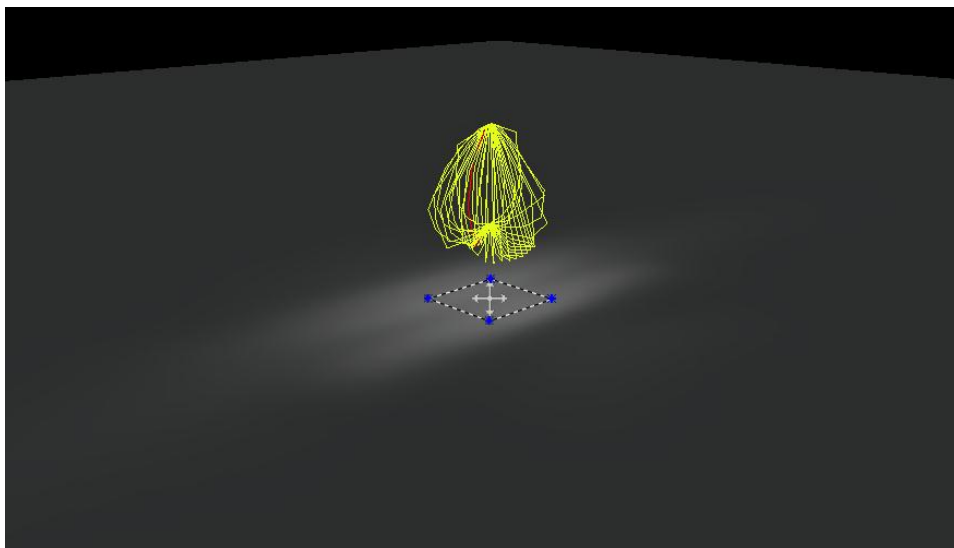
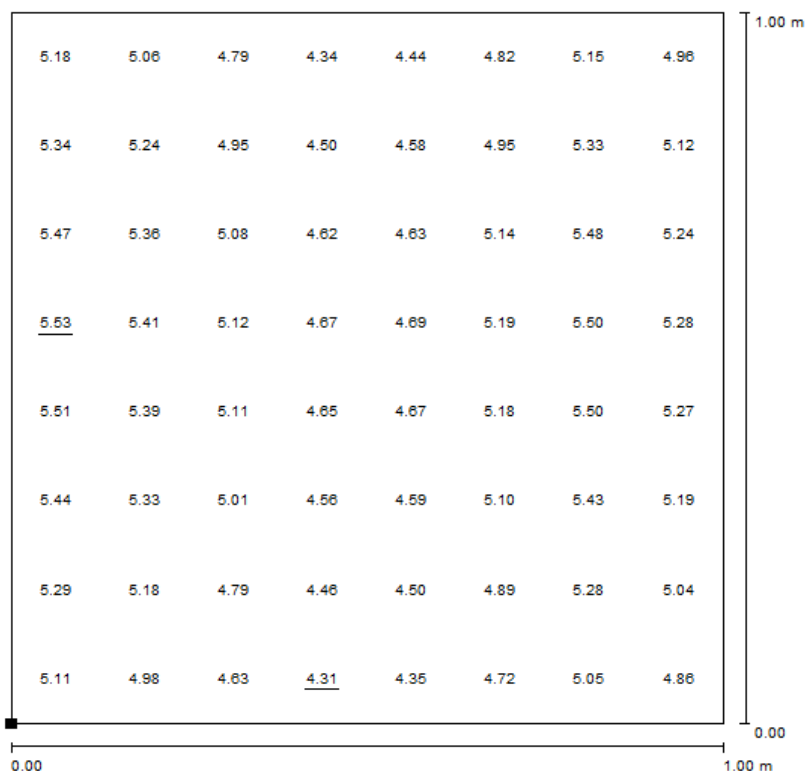


Fig.8.22 - Vista 3D SC 1x1m piano posto a 2m dall'apparecchio

I valori risultanti, si andranno successivamente a comparare con delle misurazioni strumentali eseguite in laboratorio in condizioni fisiche analoghe: ci si porrà in un ambiente totalmente non riflettente, si fisserà il campione da misurare e a 2 metri altezza, effettuando una misura con un luxmetro su una griglia posta a pavimento di misure $1 \times 1 \text{m}^2$.



Valori in Lux, Scala 1 : 8

Posizione della superficie nella scena esterna:
 Punto contrassegnato: (199.500 m,
 199.500 m, 0.000 m)



Reticolo: 8 x 8 Punti

| | | | | |
|------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| E_m [lx] | E_{min} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} / E_m | E_{min} / E_{max} |
| 5.01 | 4.31 | 5.53 | 0.860 | 0.780 |

I valori misurati in laboratorio con luxmetro ASITA LX421 rispecchiano quelli elaborati dal software.

Al centro è stato misurato un valore di 4,687 lx. Negli angoli, partendo da quello in alto a sinistra e andando in senso orario, rispettivamente: 5.201lx; 4,991lx; 4,877lx; 5,151lx.

Il leggero scostamento dalle misure computazionali a quelle eseguite in laboratorio è imputabile alla precisione dello strumento in questione ($\pm 3\%$ valore letto $\pm 0,5\%$ fondo scala).

Ovviamente si ha provato un posizionamento aleatorio e semplice da riprodurre fisicamente in laboratorio, tuttavia lo scopo era quello di avere un riscontro luxmetrico fra i valori ottenuti tramite software e i valori misurabili sperimentalmente. Una volta visto che la correlazione esiste, che è confermata, e che i valori discostano di poco, si può concludere che tutti i valori di illuminamento ottenuti tramite software Dialux possiedono un buon grado di attendibilità in riferimento ad una situazione di posa reale.

Capitolo 9

Installazione del sistema

Prima di addentrarsi nei confronti effettuati fra il sistema tradizionale di illuminazione in galleria (con apparecchi illuminanti che utilizzano lampade fluorescenti compatte da 18W disposte ogni 15m) con il sistema a sorgenti LED installate all'interno del corrimano, occorre una piccola premessa sull'impiantistica a monte degli apparecchi illuminanti.

9.1 Descrizione del sistema tradizionale

La fonte primaria di distribuzione dell'alimentazione dev'essere derivata per ciascun imbocco della galleria in ordine di priorità da:

- Ente fornitore MT o BT tramite una apposita cabina di interconnessione;
- Sottostazione elettriche (SSE) tramite linea dedicata;
- Linea di contatto tramite apposito convertitore DC/AC per 3kVd.c. e da feeder per 25kVc.a.

L'alimentazione di impianto di sicurezza in galleria avviene tramite 2 cabine di trasformazione (MT/1KV oppure bt/1KV) poste gli imbocchi della galleria e ciascuna derivata da una delle fonti sopra indicate tra loro distinte in modo da assicurare l'alimentazione a 1KV nel caso di mancanza di una delle due fonti.

Nel caso di gallerie superiori a 10Km vengono previste altre cabine di trasformazione sulle finestre intermedie.

Nel caso di alimentazione in MT viene trasformata in bt 400V per gli usi di piazzale e delle utenze poste all'interno dei fabbricati tecnologici e in bt 1000V per l'alimentazione dei quadri di tratta (QdT).

L'impianto di una generica galleria comprende in successione:

- due postazioni denominate quadri di piazzale (QdP) poste agli imbocchi ed all'esterno della stessa;
- le dorsali di distribuzione ad 1kV (una per ogni senso di marcia dei convogli);
- quadri di tratta (QdT) disposti in galleria ogni 250m;
- apparecchi illuminanti e pulsanti.

Vedi *Schema (0) Allegato D*.

9.1.1 Quadri di Piazzale (QdP); ubicazione e condizioni di esercizio

Il complesso formato dalla coppia di QdP posizionati ai due imbocchi della galleria, provvede alla distribuzione delle tensioni ad 1kV necessarie al funzionamento di tutti i dispositivi in galleria e deve essere servito da due reti elettriche indipendenti al fine di garantire la richiesta continuità di alimentazione.

Ogni galleria deve essere normalmente alimentata soltanto da uno dei due piazzali, cioè dal relativo QdP, mentre il QdP dell'imbocco opposto deve rimanere disponibile e pronto ad intervenire in caso di perdita dell'alimentazione, per mancanza della stessa o per fuori servizio per manovra, oppure per intervento delle protezioni. In quest'ultimo caso, trattandosi di una situazione di degrado dovuta a guasto, è ammessa l'alimentazione contemporanea dei due semitratti in cui risulta divisa la galleria fino alle protezioni immediatamente a monte ed a valle del guasto che con il loro bloccamento in apertura isolano il tronco interessato. Non è ammessa l'alimentazione di una dorsale da un piazzale contemporaneamente a quella dell'altra dorsale dal piazzale opposto. Pertanto, escluso ogni caso di guasto, le due dorsali devono normalmente essere alimentate entrambe dallo stesso piazzale.

9.1.2 Dorsali di distribuzione ad 1kV

Il sistema di distribuzione a 1kV deve essere del tipo radiale bi-alimentabile basato su una configurazione del tipo entra/esci; le dorsali a 1kV che percorrono una galleria lato binario pari, lato binario dispari ed eventuali percorsi aggiuntivi per l'alimentazione dei sistemi di ventilazione, non devono mai essere collegate in parallelo.

La dorsale di distribuzione in galleria deve essere realizzata mediante l'impiego di cavi rispondenti in generale alla specifica in formazione tripolare tipo:

- FG7(O)M2CNM1 - 1,8/3kV con schermo in rame di sezione pari alla metà del conduttore di fase e comunque non inferiore 50mm².

La sezione della linea deve tener conto delle seguenti ipotesi di esercizio e di carico sull'impianto:

- Linea uniforme senza cadute di tensione su entra-esci dei QdT e dei QdP;
- Resistenze dei cavi in condizioni termiche di esercizio: 70°C;
- Tensione di cortocircuito del trasformatore di alimentazione: Vd.c. al 4%;
- Carichi dei QdT con correnti assorbite in fase con le tensioni di alimentazione.

La dorsale viene opportunamente segregata all'interno di un cunicolo.

9.1.3 Quadri di Tratta (QdT); caratteristiche generali

La potenza dei trasformatori di cabina, la relativa I_{CC} di linea e la taratura delle protezioni variano in funzione delle caratteristiche di ogni galleria con particolare riguardo al numero di nicchie presenti. A tal fine si precisa che sono previsti come requisito per ogni QdT alloggiato all'interno delle nicchie, disposte in galleria con un passo di 250m, i seguenti carichi con relativi assorbimenti:

- Armadio Help Point 400W
- Alimentazione circuiti ausiliari 24Vd.c. 150W
- Lampada luce di riferimento 50W
- Lampade illuminazione vie esodo 300W
- Perdite trasformatori e cablaggio quadro 300W

per un totale di potenza complessiva assorbita dalle utenze pari a 1200W.

A questa potenza deve essere aggiunta, solo per gallerie superiori a 5km, quella necessaria per l'alimentazione della radiopropagazione, dei dispositivi MATS valutate nelle relative specifiche in circa 1000W complessivi.

Per il calcolo della potenza necessaria occorre considerare un fattore di contemporaneità pari a 1 per l'illuminazione e valori non superiori a 0,5 per gli altri carichi.

Al valore ottenuto è necessario aggiungere il consumo di 1 proiettore da 1kW situato nell'armadio di soccorso considerato nella posizione più sfavorevole dal punto di vista della verifica delle cadute di tensione.

9.1.4 Gestione lampade di illuminazione delle vie di esodo

Caratteristiche elettriche

Gli apparecchi illuminanti dovranno essere forniti completi di tutte le parti elettriche, compresa la lampada fluorescente “compatta long life” elettronica a risparmio energetico da 18 W, vita media statistica N 33.000 ore, 4 pin - attacco G24q-2, tonalità /840 - temperatura di colore 4000°K – resa cromatica Ra>80 (1B), già montata nell'apparecchio.

Essi dovranno essere in esecuzione rifasata a $\cos \phi$ 0,9. Gli apparecchi illuminanti dovranno essere conformi alle Norme CEI EN 60598-1, nell'edizione più recente, con grado di tenuta non inferiore a IP65 ed in esecuzione a doppio isolamento in Classe II.

L'alimentatore deve essere elettronico ad alta frequenza e bassissime perdite, indice di efficienza energetica EEI=A2, e deve essere a potenza costante in uscita.

Caratteristiche ottiche, schermo e meccaniche

Ottiche:

Al fine di garantire un alto rendimento luminoso, un'appropriata distribuzione della luce e la permanenza nel tempo delle caratteristiche ottiche, gli apparecchi illuminanti dovranno essere corredati di riflettore in alluminio speculare con trattamento superficiale al titanio e magnesio (assenza di iridescenza).

Il riflettore in alluminio dovrà risultare di purezza non inferiore a 99,90%.

Schermo:

Dovrà essere documentato il superamento delle seguenti prove:

- prova di trasparenza;
- prova di resistenza all'urto meccanico;
- prova di resistenza allo sbalzo termico;
- prova della classe di reazione al fuoco.

Meccaniche:

Dovrà essere documentato il superamento delle seguenti prove:

- grado di protezione non inferiore a IP65
- prova di resistenza a sovrappressione e depressione pari a 5kPa.

Caratteristiche fotometriche

Il valore dell'illuminamento a impianto nuovo, calcolato senza tener conto delle interreflessioni degli apparecchi con le superfici della galleria, dovrà essere non inferiore a 1,5lx sul piano di calpestio nel punto intermedio tra due corpi illuminanti (7,5m). Il rapporto tra l'illuminamento minimo/medio sul piano di calpestio non dovrà essere inferiore a 0,25, considerando la disposizione degli apparecchi illuminanti, secondo la configurazione tipo rappresentata nell'allegato.

9.1.5 Cassette, pulsanti e cavi

Le cassette e i pulsanti sono regolate dalla specifica tecnica RFI DPRIM STC IFS LF614B per gallerie di lunghezza superiore 500m.

Le cassette si dividono essenzialmente di quattro tipologie:

- di derivazione tipo A
- di derivazione tipo B
- di derivazione tipo C
- per pulsante di emergenza

Si riporta una breve descrizione.

Cassetta di tipo A

Contiene un dispositivo periferico PMAE per la gestione del sistema ad onde convogliate e per l'alimentazione ed il controllo della lampada di illuminazione vie di esodo e del pulsante .Per la connessione alla dorsale 230 Va.c. della cassetta è previsto un sistema a connettori.

Cassetta di tipo B

Contiene morsettiera di derivazione per l'alimentazione della lampada di illuminazione vie di esodo (l'alimentazione delle lampade in dorsale deve essere distribuita in maniera equilibrata sulle tre fasi). Per la connessione alla dorsale 230 Va.c. della cassetta è previsto un sistema a connettori.

Cassetta di tipo C

Contiene un dispositivo periferico PMAE per la gestione del sistema ad onde convogliate e per l'alimentazione ed il controllo della lampada di riferimento e del pulsante di emergenza. Contiene la morsettiera di smistamento destra/sinistra delle dorsali di alimentazione delle lampade di illuminazione vie di esodo. Per la connessione alla dorsale 230 Va.c. della cassetta è previsto un sistema a connettori.

Cassetta per pulsante di emergenza

Contenente:

- 1 pulsante a fungo
- 1 morsettiera con un contatto NC
- 2 lampade MultiLed ad alta visibilità di colore blu a 24 Vd.c.

Le cassette tipo A, tipo B e tipo C su descritte devono possedere caratteristiche di robustezza, compattezza ed affidabilità adatte all'utilizzo in posizione particolarmente gravosa come quella sul piedritto all'interno delle gallerie ferroviarie.

Data la limitata accessibilità devono essere costruite in modo tale che, nel corso del loro esercizio ferroviario, necessitino di ridotta manutenzione. La rigidità della struttura deve prevedere dei possibili urti/sollecitazioni eventualmente causati dalla difficoltà di installazione e dal particolare utilizzo.

Le caratteristiche meccaniche principali sono riportate in seguito:

- Realizzazione in acciaio inox AISI 304 spessore 12/10 mm con grado di protezione: IP65 secondo CEI EN 60529.
- Dimensioni L 200 x H 150 x P 90 mm per cassette TIPO “A” e “TIPO B”
- Dimensioni L 340 x H 150 x P 90 mm per cassette TIPO “C”
- Dimensioni L 100 x H 100 x P 75 mm per cassette pulsanti di emergenza

Le cassette per i pulsanti di emergenza sono comprensive di:

Il pulsante di emergenza a fungo.

Sulle pareti laterali della stessa cassetta dovranno essere montate due lampade MultiLED ad alta visibilità 24 Vd.c. di colore blu, le quali devono permettere nel buio della galleria una rapida individuazione del pulsante di emergenza, con visibilità non inferiore a 30 metri lineari.

La cassetta dovrà garantire la Classe di isolamento II.

Per quanto riguarda la tipologia di cavi, le linee elettriche di potenza, controllo e comando, saranno tutte realizzate in FG10(O)M1 con formazione e sezione appropriata al servizio richiesto, non propagante l'incendio e a bassa emissione di fumi, gas tossici e corrosivi - tensione nominale Uo/U 0,6/1 Kv .

L'accensione in emergenza deve avvenire qualora risulti dal PMAE premuto uno dei pulsanti a fungo di emergenza. L'accensione delle lampade di illuminazione delle vie di esodo del QdT avente giurisdizione elettrica sul pulsante di emergenza premuto deve avvenire per comando diretto da parte del MAE del quadro elettrico stesso (così da poter accendere le lampade del singolo QdT anche nel caso di PLC guasto); la condizione di “pulsante di emergenza premuto” deve essere rilevata direttamente dal PMAE e non desunta da altre condizioni e deve essere riportata dal MAE al PLC del QdT e conseguentemente alle Centrali Master. La Centrale Master deve provvedere all'accensione di tutte le lampade di illuminazione delle vie di esodo della galleria inviando il relativo comando di accensione a tutte i rimanenti QdT iniziando dai QdT vicini e proseguendo verso gli imbocchi (accensione antipanico).

Lo spegnimento deve avvenire in base a comando manuale effettuato dalla Postazione Operatore.

9.2 Descrizione del sistema innovativo a LED

L'innovazione è principalmente nella sostituzione della sorgente luminosa posta in galleria: dalle attuali lampade fluorescenti compatte, situate in modo puntiforme ogni 15m all'interno di apparecchiature illuminanti tradizionali, ad un'illuminazione a sorgenti LED di tipo continuo lungo tutta la percorrenza della galleria (con i già descritti vantaggi tecnici).

L'apparecchio illuminante introdotto possiede tutti i requisiti di conformità alle più attuali normative vigenti, nonché test positivi riguardo caratteristiche ottiche, schermo e meccaniche (§.3.1).

Tale innovazione è stata recepita anche nella obbligatorietà di utilizzo di un corrimano distribuito per tutta la lunghezza della galleria ferroviaria. Si è quindi pensato di sfruttare quest'ultimo sia come supporto del sistema illuminante sia come elemento strutturale (obbligatorio).

A tal riguardo sono state fatte le seguenti considerazioni tecniche:

- Mantenere la filosofia di impianto (QdP, linea dorsale 1kV, QdT) per non creare stravolgimenti all'interno del *sistema-galleria*;
- Installazione 2 alimentatori interagenti ogni 50m circa del tipo 230Va.c./24Vd.c. della potenza che va dai 30W ai 120W cada uno.
- Installazione del sistema illuminante ad un'altezza di 1,15m dal piano di calpestio.

Si è ritenuto opportuno che ogni tratto del sistema illuminante di 50m venga connesso ad un ramo alimentato da un alimentatore da 120W (sovradimensionato). L'altro ramo alimentato da un alimentatore gemello, fornirà altri 50m in direzione opposta. Nell'eventualità di un'anomalia ad un alimentatore, il suo carico viene automaticamente alimentato dall'altro. Tale affidabilità del sistema necessita degli alimentatori di potenza doppia rispetto alla potenza richiesta dal carico.

Si è anche ritenuto opportuno studiare due realizzazioni del sistema illuminante:

- Un sistema con corrimano continuamente illuminato con una potenza assorbita di 1W/m;
- Un sistema con un metro di sistema illuminante e un metro cieco, con una potenza assorbita pari al 50% del precedente (0,5W/m).

Nota: nel secondo caso, i due alimentatori gemelli saranno per ovvia ragione, anch'essi dimezzati, utilizzando alimentatori sovradimensionati da 60W.

Il sistema essendo a bassissima tensione (SELV) non impone particolari protezioni contro i contatti indiretti. Essendo la cassetta di alimentazione realizzata a doppio isolamento, tutta l'impiantistica, partendo dal QdT, risulta essere di classe II.

Per quanto riguarda il posizionamento rientrante nelle zone di interferenza con la trazione elettrica TE (in pianta 3m per sistemi 3kV - 4m per sistemi 25kV), il sistema illuminante dovrà essere

collegato elettricamente all'impianto di ritorno TE con le modalità contenute nelle specifiche tecniche di RFI.

Sono state eseguite, inoltre, delle ottimizzazioni al fine di risparmiare l'impiantistica in galleria attraverso la riduzione dei QdT, con l'intenzione estremizzata di eliminarli totalmente nel caso di galleria di lunghezza pari a circa 2000m. Questo sarebbe possibile a livello impiantistico poiché rimarrebbero fuori dalla galleria solo quadri bt, ossia quadri alimentati a 400V e non a 1000V come i QdT. (vedi analisi economico al §10).

Per una maggiore comprensione dell'installazione si rimanda all'allegato grafico (Vedi *schemi circuitali (A), (B), (C), (D), (E) Allegato D*).

Capitolo 10

Realizzazione del sistema di illuminazione a sorgenti LED e ottimizzazione tecnico-economica degli impianti

Il sistema innovativoLED è stato confrontato in più modi rispetto a quello tradizionale (*Allegato D*):

- (0) Sistema di confronto di tipo tradizionale, ovvero QdT ogni 250m, 17 apparecchi illuminanti funzionanti con lampade fluorescenti compatte da 18W poste ad un'interdistanza di circa 15m e ad un'altezza di 2,30m rispetto al piano di calpestio;
- (A) Sostituzione delle apparecchiature mantenendo l'interdistanza 250m tra i quadri di tratta (QdT);
- (B) Sostituzione delle apparecchiature aumentando a 500m l'interdistanza tra i quadri QdT;
- (C) Sostituzione delle apparecchiature aumentando a 1000m l'interdistanza tra i quadri QdT;
- (D) Sostituzione delle apparecchiature aumentando a 2000m l'interdistanza tra i quadri QdT.
- (E) Installazione delle apparecchiature aumentando per una galleria di lunghezza pari a 2000m senza quadri di tratta (QdT) interni ma con alimentazione in bT 400V direttamente dal piazzale esterno.

I casi (0), (A), (B) e (C) di sopra sono stati analizzati per un tratto di galleria di lunghezza pari a 1000m, i casi (D) ed (E) per un tratto di galleria di 2000m ed entrambi per un tempo di gestione pari a 100.000 ore di funzionamento equivalente alla vita utile minima garantita delle sorgenti LED.

In queste comparazioni sono stati presi come riferimento i due sistemi a LED:

- Corrimano con illuminazione continua (1W/metro lineare) “Funzionamento normale”;
- Corrimano con illuminazione discontinua al 50% (0,5W/metro lineare) “Funzionamento normale/economico”.

Si è riscontrato, come da §8.2.5, che i parametri illuminotecnici minimi dettati dalla norma sono verificati anche nel caso di “funzionamento normale/economico”.

Il sistema di “funzionamento normale” dà apprezzabili miglioramenti dei parametri caratteristici illuminotecnici (§8.2.2). Scegliendo questo sistema, è stata verificata un’ulteriore e ultima alternativa, quella di un’illuminazione rischiarante di cui si è accennato al §8, che tuttavia non si dimostrerà: il 50% degli apparecchi illuminanti di tipo **c’)** rimarrà installato come finora studiato (Fig.5.1, §5), ruotando il 50% degli apparecchi illuminanti di tipo **d’)** verso l’alto, si è riscontrato un miglioramento delle condizioni visive globali della galleria che possono permettere anche un controllo visivo delle apparecchiature di trazione poste in alto (ciò pur sempre rispettando sulle superfici di calcolo adottate i parametri minimi dettati dalla norma). Le parti ruotate verso l’alto è opportuno che montino stringhe LED di tipo **c)** (§7.1.3) con applicazione di una seconda ottica montata singolarmente su ogni LED formante così l’apparecchio illuminante di tipologia **d’)** (§7.2.5), questo per focalizzare il fascio verso l’alto, con piccoli angoli di apertura, rischiarando la volta della galleria e evitando l’abbagliamento del personale esodante.

Per le situazioni sopra esposte sono state stilate delle tabelle tecniche e perizie economiche comparative. Si rimanda all’*Allegato G*.

In tale tabelle si mette in evidenza che sia i costi di realizzo che quelli di gestione sono ridotti rispetto ad un sistema tradizionale.

Conclusioni

Dal punto di vista del rispetto ambientale e del contenimento dei consumi energetici, il LED ha una figura centrale nel panorama delle sorgenti per l'illuminazione.

Come analizzato nello sviluppo di questo elaborato, gli impianti con tecnologia LED, sono decisamente vantaggiosi soprattutto per quattro aspetti:

1. Ottimi risultati fotometrici e buoni livelli di illuminamento prodotti sulle superfici richieste.
2. Garantiscono consumi inferiori, rispetto alle tradizionali fonti di illuminamento;
3. Durata di gran lunga maggiore (superiore alle 100.000 ore, quindi, almeno 11 anni di utilizzo continuo 24 ore su 24) rispetto alle lampade fluorescenti (circa 7000 ore);
4. Ridotti costi di realizzazione e gestione degli impianti.

I benefici ed i vantaggi della tecnologia a LED uniscono quelle che sono le migliori caratteristiche di tutte le altre fonti di illuminamento, partendo dai consumi più bassi fino ad arrivare alla qualità della luce migliore che una sorgente artificiale possa emettere.

In particolare i vantaggi della sorgente luminosa LED possono esemplificarsi in:

- Total Cost of Ownership inferiore rispetto ad ogni altra tecnologia: riduzione del consumo energetico tra il 50% ed il 75%;
- Lungo ciclo di vita (oltre 100.000 ore);
- Stabilità delle performance nel tempo (altre tecnologie hanno riduzioni significative già dopo 3.000 ore);
- Alta qualità della luce: luce ideale per l'occhio umano;
- Buon Indice di Resa Cromatica;
- Zero emissioni di raggi UV e IR;
- Funzionamento a basso voltaggio;
- Limitato impatto ambientale e facilità di smaltimento: nessuna presenza di piombo, mercurio e altri metalli pesanti;
- Accensione istantanea (nanosecondi);
- Ampio range di temperatura ambiente per il funzionamento.

Come si evince dalle tabelle delle perizie allegate, fronte di un costo di realizzo pari o inferiore rispetto alle tecnologie tradizionali, il sistema a sorgenti LED presenta dei vantaggi nei costi di gestione, dovuti principalmente ad una durata di vita ed un mantenimento del flusso luminoso migliori rispetto alle dirette avversarie. Tale principale caratteristica le rende una competitiva alternativa alle lampade fluorescenti, in impianti in cui il tempo di utilizzo risulti abbastanza elevato con interventi manutentivi difficoltosi.

Fermo restando che nell'applicazione in esame sono stati ottenuti risultati che rispecchiano perfettamente le esigenze normative e tecniche richieste, gli aspetti potenzialmente migliorabili del sistema sono quelli che riguardano:

- l'uniformità dell'illuminamento per altezza superiori ad un metro;
- valori di illuminamento nelle zone alte della volta per eventuali controlli visivi.

Per un miglioramento di entrambe le voci, si può pensare di abbinare al sistema studiato dei moduli rivolti verso l'alto per rischiarare l'ambiente con particolari diffusori atti ad evitare l'abbagliamento.

Riferimenti

Bibliografia

- [1] - E. F. Schubert, Light Emitting Diodes, Cambridge University Press, 2006
- [2] - R. C. Jaeger e T. N. Blalock, Microelettronica e Elettronica analogica, McGraw-Hill, 2005
- [3] - I. Barducci, Fotometria e colorimetria, ESA, 1982
- [4] - A. Zukauskas, Introduction to Solid State Lighting, Wiley, 2002
- [5] - D. Scullino, Il LED e l'illuminazione, Sandit Libri, 2007
- [6] - G. Forcolini, Illuminazione LED, Hoepli, 2008
- [7] - Riviste AEIT, No 3, marzo 2012
- [8] - Pubblicazioni CIE, No. 15 1971
- [9] - DM [28-10-05]
- [10] - STI Sicurezza gallerie Decisione 20_12_2007 (2008-163-CE)
- [11] - Materiale dotazione RFI / ITALFERR

Siti internet:

www.osram.com

www.seoul.com

www.dialux.com

www.illuminabyivela.it

www.qualenergia.it

www.progettazione-impianti-elettrici.it

www.prolight.it

www.unipd.it

www.unina.it

Allegati